

**SVEUČILIŠTE U ZAGREBU**  
**FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE**

# **DIPLOMSKI RAD**

**Marko Pulić**

**Zagreb, 2017.**

**SVEUČILIŠTE U ZAGREBU**  
**FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE**

# **DIPLOMSKI RAD**

**Mentor:**

**Prof. dr. sc. Danko Ćorić**

**Student:**

**Marko Pulić**

**Zagreb, 2017.**

## **IZJAVA**

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći stečena znanja tijekom studija i navedenu literaturu. Zahvaljujem se mentoru prof. dr. sc. Danku Ćoriću na savjetima i uputstvima pri izradi ovog rada. Zahvaljujem se i djelatnicima Laboratorija za alatne strojeve, Laboratorija za toplinsku obradu, Laboratorija za metalografiju i Laboratorija za mehanička ispitivanja Fakulteta strojarstva i brodogradnje bez kojih ne bi bilo moguće napraviti eksperimentalni dio rada.

Marko Pulić



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
**FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE**



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite  
Povjerenstvo za diplomske ispite studija strojarstva za smjerove:  
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment, inženjerstvo  
materijala te mehatronika i robotika

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur. broj:	

## DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **Marko Pulić**

Mat. br.: 0035181189

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Utjecaj toplinske obrade na mikrostrukturu i mehanička svojstva aluminijske legure**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Influence of Heat Treatment on the Microstructure and Mechanical Properties of Aluminium Alloy**

Opis zadatka:

Aluminijske legure su važan konstrukcijski materijal iz skupine lakih metala. Jedna od osnovnih prednosti je povoljan omjer čvrstoće i gustoće (specifična čvrstoća) posebice kada se koriste u toplinski očišćenom stanju. Gustoća aluminija je oko jedne trećine gustoće čelika, pa se aluminijske legure prvenstveno koriste u proizvodnji zrakoplova i vozila, ali i za druge namjene. Mnogim aluminijskim legurama mogu se mehanička svojstva poboljšati precipitacijskim očišćenjem čime se dobivaju legure koje imaju specifičnu čvrstoću kao i mnogi čelici.

U radu je potrebno načiniti sljedeće:

1. navesti najvažnija svojstva tehničkog aluminija i aluminijskih legura;
2. opisati postupak proizvodnje aluminija;
3. opisati mehanizam precipitacijskog očišćenja;
4. navesti područja primjene aluminija i njegovih legura;
5. toplinski obraditi raspoložive uzorke;
6. analizirati mikrostrukturu i ispitati mehanička svojstva;
7. obraditi i analizirati rezultate;
8. donijeti odgovarajuće zaključke.

U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:  
11. svibnja 2017.

Rok predaje rada:  
13. srpnja 2017.

Predvideni datum obrane:  
19., 20. i 21. srpnja 2017.

Zadatak zadao:

Izv. prof. dr. sc. Danko Čorić

Predsjednica Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Biserka Runje

# SADRŽAJ

SAŽETAK.....	1
1. UVOD .....	2
2. DOBIVANJE ALUMINIJA .....	3
3. SVOJSTVA ALUMINIJA I ALUMINIJEVIH LEGURA.....	8
4. MEHANIZMI OČVRSNUĆA.....	12
4.1. Očvrsnuće kristalima mješancima (legiranjem) .....	12
4.2. Očvrsnuće deformacijom.....	14
4.3. Precipitacijsko očvrsnuće .....	15
4.4. Precipitacija Al-Cu legura (duraluminija) .....	20
5. PRIMJENA ALUMINIJA I NJEGOVIH LEGURA .....	28
5.1. Primjena u graditeljstvu.....	28
5.2. Primjena u industriji motornih vozila.....	29
5.3. Primjena u brodogradnji .....	30
5.4. Primjena aluminija u zrakoplovstvu .....	31
5.5. Primjena aluminija u prehrambenoj industriji .....	32
6. EKSPERIMENTALNI DIO .....	33
6.1. Plan eksperimenta.....	33
6.2. Rezanje uzoraka.....	34
6.3. Ispitivanje kemijskog sastava .....	34
6.4. Toplinska obrada .....	35
6.4.1. Rastopno žarenje .....	35
6.4.2. Dozrijevanje .....	37
6.5. Priprema epruveta za ispitivanje mikrostrukture i mjerenje tvrdoće.....	39
6.6. Ispitivanje mikrostrukture.....	41
6.7. Ispitivanje udarnog rada loma .....	53
6.8. Ispitivanje tvrdoće .....	61
6.9. Usporedba tvrdoće i udarnog rada loma.....	65
6.10. Analiza prijelomne površine .....	67
7. ZAKLJUČAK .....	76
LITERATURA.....	77
PRILOG .....	78

## POPIS SLIKA

Slika 1. Uzorak tehničkog aluminija .....	2
Slika 2. Boksit .....	3
Slika 3. Glinica .....	4
Slika 4. Elektroliza aluminija .....	4
Slika 5. Ciklus proizvodnje aluminija .....	5
Slika 6. Čelije za elektrolizu .....	6
Slika 7. Fazni dijagram Al-Mg .....	12
Slika 8. TTT dijagram precipitacije Mg <sub>5</sub> Al <sub>8</sub> za čvrstu otopinu Al-5,5% Mg .....	13
Slika 9. Opći postupak precipitacijskog očvršćivanja .....	16
Slika 10. Tipovi precipitata .....	19
Slika 11. Al-Cu fazni dijagram .....	20
Slika 12. Mikrostrukture pri sobnoj temperaturi za Al+4%Cu leguru a) sporo hladeno s 550 °C - precipitati su krupni i izrazito udaljeni, b) brzo hladeno s 550 °C - precipitati su sitni i zbijeni ..	21
Slika 13. TTT dijagram precipitacije CuAl <sub>2</sub> (Al+ 4% Cu) .....	22
Slika 14. Stupnjevi precipitacije za Al-Cu leguru .....	24
Slika 15. Ovisnost granice razvlačenja gašene Al legure s 4% Cu .....	25
Slika 16. Dislokacije mogu savladati precipitate .....	26
Slika 17. Stupnjevito povećanje razmaka između čestica s vremenom dozrijevanja .....	26
Slika 18. TTT dijagram za Al leguru s 4% Cu .....	27
Slika 19. Platforma za helikopter .....	28
Slika 20. Pješački most „Yanchep“ u Australiji .....	29
Slika 21. Aluminijski blok motora .....	30
Slika 22. Aluminijski katamaran .....	30
Slika 23. Konstrukcija krila .....	31
Slika 24. Aluminijske posude za hranu	Slika 25. Aluminijske limenke .....
Slika 26. Epruvete nakon označivanja .....	34
Slika 27. Ternarni dijagram stanja Al-Mg-Si – projekcija topljivosti .....	35
Slika 28. Ternarni dijagram stanja Al-Mg-Si – projekcija solidusa .....	36
Slika 29. Komorne elektro-peći .....	37
Slika 30. Brusilica „Buehler“ .....	39
Slika 31. Uređaj za poliranje „Struers DAP-V“ .....	40
Slika 32. Polirane epruvete .....	40
Slika 33. Mikroskop Olympus GX51F-5 .....	41
Slika 34. Mikrostruktura uzorka 33 / nedozrijevano, hladeno na zraku .....	42
Slika 35. Mikrostruktura uzorka 33 / nedozrijevano, hladeno na zraku .....	42
Slika 36. Mikrostruktura uzorka 30/ nedozrijevano, gašeno u vodi .....	43
Slika 37. Mikrostruktura uzorka 30/ nedozrijevano, gašeno u vodi .....	43
Slika 38. Mikrostruktura uzorka 1/ dozrijevano 1 h pri 130 °C .....	44
Slika 39. Mikrostruktura uzorka 1/ dozrijevano 1 h pri 130 °C .....	44
Slika 40. Mikrostruktura uzorka 4/ dozrijevano 4 h pri 130 °C .....	45
Slika 41. Mikrostruktura uzorka 4/ dozrijevano 4 h pri 130 °C .....	45
Slika 42. Mikrostruktura uzorka 7/ dozrijevano 10 h pri 130 °C .....	46

Slika 43. Mikrostruktura uzorka 7/ dozrijevano 10 h pri 130 °C .....	46
Slika 44. Mikrostruktura uzorka 10/ dozrijevano 1 h pri 160 °C .....	47
Slika 45. Mikrostruktura uzorka 10/ dozrijevano 1 h pri 160 °C .....	47
Slika 46. Mikrostruktura uzorka 13 / dozrijevano 4 h pri 160 °C .....	48
Slika 47. Mikrostruktura uzorka 13/ dozrijevano 4 h pri 160 °C .....	48
Slika 48. Mikrostruktura uzorka 16/ dozrijevano 10 h pri 160 °C .....	49
Slika 49. Mikrostruktura uzorka 16/ dozrijevano 10 h pri 160 °C .....	49
Slika 50. Mikrostruktura uzorka 19/ dozrijevano 1 h pri 190 °C .....	50
Slika 51. Mikrostruktura uzorka 19/ dozrijevano 1 h pri 190 °C .....	50
Slika 52. Mikrostruktura uzorka 22/ dozrijevano 4 h pri 190 °C .....	51
Slika 53. Mikrostruktura uzorka 22/ dozrijevano 4 h pri 190 °C .....	51
Slika 54. Mikrostruktura uzorka 25/ dozrijevano 10 h pri 190 °C .....	52
Slika 55. Mikrostruktura uzorka 25/ dozrijevano 10 h pri 190 °C .....	52
Slika 56. Charpyjev bat .....	53
Slika 57. Dimenzije epruvete za Charpyjev test .....	53
Slika 58. Položaj epruvete u osloncima                      Slika 59. Shematski prikaz načina udarnog opterećivanja epruvete na Charpyjevu batu .....	54
Slika 60. Izmjerene vrijednosti udarnog rada loma za nedozrijevane uzorke.....	56
Slika 61. Izmjerene vrijednosti udarnog rada loma / dozrijevano pri 130 °C .....	57
Slika 62. Izmjerene vrijednosti udarnog rada loma / dozrijevano pri 160 °C .....	57
Slika 63. Izmjerene vrijednosti udarnog rada loma / dozrijevano pri 190 °C .....	58
Slika 64. Srednje vrijednosti udarnog rada loma / dozrijevano pri 130 °C .....	58
Slika 65. Srednje vrijednosti udarnog rada loma / dozrijevano pri 160 °C .....	59
Slika 66. Srednje vrijednosti udarnog rada loma / dozrijevano pri 190 °C .....	59
Slika 67. Ovisnost udarnog rada loma o temperaturi i vremenu dozrijevanja .....	60
Slika 68. Referentni tvrdomjer „Indetec“ .....	61
Slika 69. Srednje vrijednosti tvrdoće / dozrijevano pri 130 °C .....	63
Slika 70. Srednje vrijednosti tvrdoće / dozrijevano pri 160 °C .....	63
Slika 71. Srednje vrijednosti tvrdoće / dozrijevano pri 190 °C .....	64
Slika 72. Ovisnost tvrdoće o temperaturi i vremenu dozrijevanja .....	64
Slika 73. Usporedba tvrdoće i udarnog rada loma / dozrijevano pri 130 °C .....	65
Slika 74. Usporedba tvrdoće i udarnog rada loma / dozrijevano pri 160 °C .....	66
Slika 75. Usporedba tvrdoće i udarnog rada loma / dozrijevano pri 190 °C .....	66
Slika 76. Skica prijelomne površine epruvete .....	67
Slika 77. Predložak lomova za vizualnu usporedbu s postotnim udjelom žilavog loma .....	67
Slika 78. Prijelomna površina epruvete 30 / rastvorno žareno i gašeno u vodi .....	69
Slika 79. Prijelomna površina epruvete 33 / rastvorno žareno i hlađeno na zraku .....	69
Slika 80. Prijelomna površina epruvete 1 / dozrijevano 1 h pri 130 °C .....	70
Slika 81. Prijelomna površina epruvete 4 / dozrijevano 4 h pri 130 °C .....	70
Slika 82. Prijelomna površina epruvete 7 / dozrijevano 10 h pri 130 °C .....	70
Slika 83. Prijelomna površina epruvete 10 / dozrijevano 1 h pri 160 °C .....	71
Slika 84. Prijelomna površina epruvete 13 / dozrijevano 4 h pri 160 °C .....	71
Slika 85. Prijelomna površina epruvete 16 / dozrijevano 10 h pri 160 °C .....	71
Slika 86. Prijelomna površina epruvete 19 / dozrijevano 1 h pri 190 °C .....	72
Slika 87. Prijelomna površina epruvete 22 / dozrijevano 4 h pri 190 °C .....	72

Slika 88. Prijelomna površina epruvete 25 / dozrijevano 10 h pri 190 °C .....	72
Slika 89. Udjeli krhkog i duktilnog loma / dozrijevano pri 130 °C .....	73
Slika 90. Udjeli krhkog i duktilnog loma / dozrijevano pri 160 °C .....	73
Slika 91. Udjeli krhkog i duktilnog loma / dozrijevano pri 190 °C .....	74
Slika 92. Ovisnost postotnog udjela krhkog loma o temperaturi i vremenu dozrijevanja .....	75
Slika 93. Ovisnost postotnog udjela duktilnog loma o temperaturi i vremenu dozrijevanja .....	75



## POPIS TABLICA

Tablica 1. Fizikalna svojstva čistog aluminijskog ..... 8	8
Tablica 2. Granica razvlačenja Al-legura serije 5000 (Al-Mg) ..... 14	14
Tablica 3. Granica razvlačenja za aluminijske legure očvrstive hladnom deformacijom..... 14	14
Tablica 4. Kemijski sastav ispitivane aluminijske legure ..... 34	34
Tablica 5. Temperaturno-vremenski režimi dozrijevanja ..... 38	38
Tablica 6. Srednje vrijednosti žilavosti i standardna devijacija za toplinski obrađene Al-uzorke 55	55
Tablica 7. Karakteristike tvrdomjera „Indentec“ ..... 61	61
Tablica 8. Srednje vrijednosti tvrdoće i standardna devijacija za toplinski obrađene Al-uzorke .62	62
Tablica 9. Udjeli žilavog i krhkog loma za toplinski obrađene Al-uzorke ..... 68	68
Tablica 10. Postotni udio duktilnog loma za dimenzije u milimetrima ..... 68	68

## POPIS OZNAKA

Simbol	Jedinica	Značenje
--------	----------	----------

$\bar{d}$	mm	Aritmetička srednja vrijednost izmjerenih duljina dijagonala pet otisaka
$d_{sr}$	mm	Aritmetička srednja vrijednost izmjerenih duljina dvije dijagonale otiska
$F$	N	Ispitna sila
$G$	N	Težina bata
$HV$	-	Tvrdoća
$\overline{HV}$	-	Aritmetička srednja vrijednost izmjerenih tvrdoća
$h_1$	m	Početna visina bata
$h_2$	m	Konačna visina bata
$KU$	J	Udarni rad loma na epruveti s “U” utorom
$KV$	J	Udarni rad loma na epruveti s “V” utorom
$t$	s, h	Vrijeme
$\varepsilon$	%	Deformacija
$\vartheta$	°C	Celzijusova temperaura

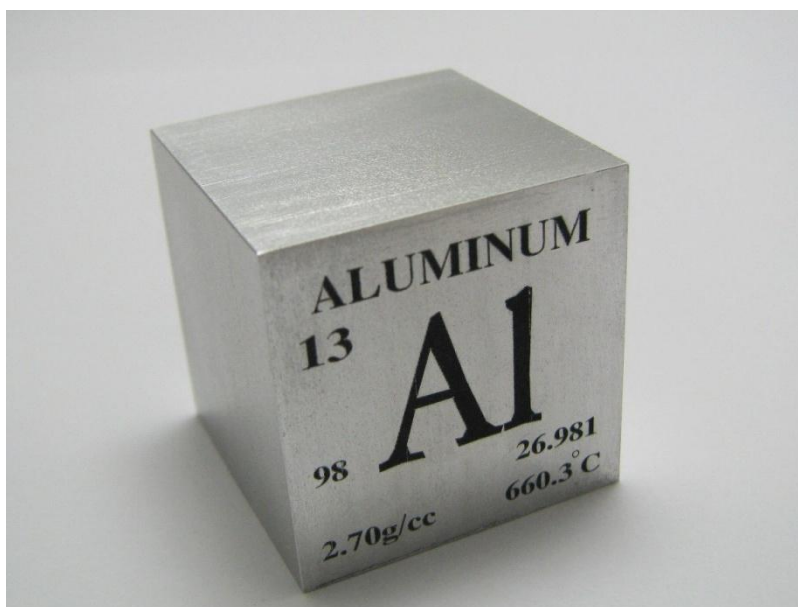
## SAŽETAK

U teoretskom dijelu ovog rada opisana su svojstva aluminijske legure i njenih legura, opisan je postupak proizvodnje aluminijske legure, mehanizam precipitacijskog očvršćivanja, navedena su i neka bitnija područja primjene.

U eksperimentalnom dijelu provedeno je toplinsko očvršćivanje aluminijske legure koja se sastoji od rastopnog žarenja i dozrijevanja u različitim temperaturno-vremenskim režimima. Analizirana je mikrostruktura toplinski obrađene slitine, izmjerene su tvrdoće uzoraka, ispitan je udarni rad loma i analizirane prijelomne površine u pogledu udjela duktilnog i krhkog loma, a sve s ciljem dobivanja spoznaja o utjecaju parametara dozrijevanja na mikrostrukturu i svojstva ispitivane Al-slitine.

## 1. UVOD

Aluminij je srebrno-bijeli sjajni metal koji spada u treću grupu periodnog sustava elemenata. S 8.1% težinskog udjela treći je najzastupljeniji element u zemljinoj kori odmah iza kisika i silicija. Talište je pri 660 °C a vrelište na 2519 °C. Jako je reaktivan ali je zaštićen tankim slojem oksida koji brzo nastaje na zraku. Sloj oksida debljine je samo nekoliko tisućinki milimetra ali je toliko gust da vlaga i zrak ne mogu doprijeti do aluminija. Zbog svojstava kao što su niska specifična gustoća, otpornost na koroziju, dobra toplinska i električna vodljivost, dobra strojna oblikovljivost i livljivost koristi se u brodogradnji, zrakoplovnoj i automobilske industriji, građevinarstvu, informatici, bojama i lakovima, pirotehnici i prehrambenoj industriji.



Slika 1. Uzorak tehničkog aluminija

## 2. DOBIVANJE ALUMINIJA

Aluminij se u prirodi nalazi u obliku oksida i smjese oksida iz kojih se metal izdvaja postupkom elektrolize. Najprije se iz oksidne rude, boksita, dobiva aluminijev oksid ili glinica, a zatim daljnjim pročišćavanjem glinice nastaje aluminij. Boksit je heterogena ruda koja se uglavnom sastoji od jednog ili više aluminijevih hidroksida, a isto tako može sadržavati i silicij dioksid te željezni oksid, slika 2. Aluminijev oksid se u boksitu javlja u tri hidratizirane mineralne vrste poznate pod nazivima hidragilit, bemit i dijaspor.

Glinica se iz oksidne rude (boksita) izvlači zagrijavanjem s jeftinim redukcijskim sredstvom (ugljik u obliku koksa), a dobiveni sirovi metal se rafinira, čime se omogućuje oksidacija većine prisutnih nečistoća.



Slika 2. Boksit

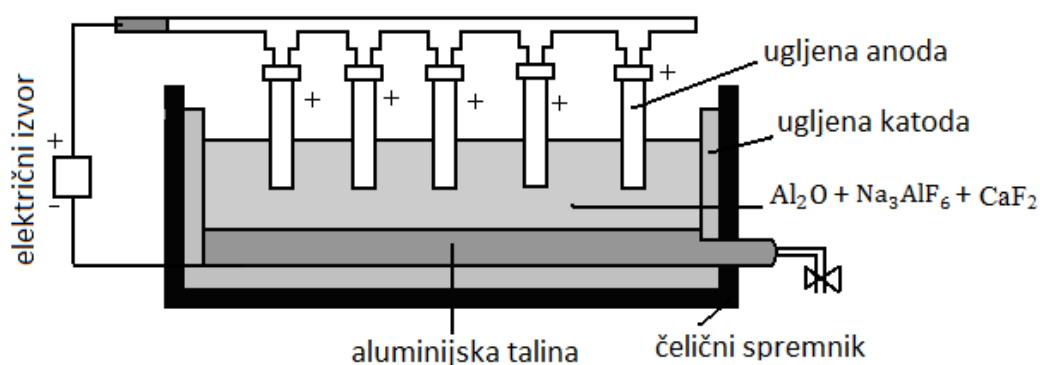
Prvi postupak proizvodnje elementarnog aluminija vezuje se uz 1825. godinu kada je danski fizičar i kemičar Hans Christian Ørsted 1825. godine uporabom skupog redukcijskog sredstva u obliku metalnog kalija po prvi put izolirao kemijski element aluminij. Do 1886. godine aluminij je smatran rijetkim i dragocjenim metalom, a te godine su Charles Martin Hall i Paul Héroult otkrili relativno jeftin postupak proizvodnje aluminija, što je uvelo aluminij na „svjetsku scenu“. Osnovni problem visokog tališta glinice  $\text{Al}_2\text{O}_3$  je riješen je dodatkom kriolita  $\text{Na}_3\text{AlF}_6$ . Pri 950 °C dolazi do taljenja smjese kriolita i glinice iz koje se aluminij dobiva elektrolitičkom redukcijom na katodnom dnu ili katodi. Jakost električne struje pri procesu elektrolize iznosi

150000A a napon je oko 5V. Katode su uglavnom izrađene od ugljena te polako izgaraju i reagiraju s kisikom i fluorom iz elektrolita (najčešće rastaljeni kriolit).



Slika 3. Glinica

Aluminij se izlučuje na katodi i pada na dno kupke, a na anodi se oslobađa ugljični dioksid. Sam kriolit ne sudjeluje u elektrolitičkom procesu nego pliva na površini i štiti aluminij od oksidacije. Tako nastaju određene količine plinova CO i CO<sub>2</sub> te plinoviti spojevi s fluorom koji pridonose efektu staklenika. Dobiveni aluminij drži se na visokim temperaturama nekoliko sati kako bi iz njega iščezli elementi poput bakra, cinka, silicija i titana. Najveća moguća čistoća od 99,999% dobiva se električnom rafinacijom. Slika 4 prikazuje osnovni proces elektrolize.



Slika 4. Elektroliza aluminija

Za dobivanje 1 tone aluminija potrebno je približno utrošiti 4,5 tone boksita, 0,5 tona ugljenih elektroda i 14000 kWh električne energije. Na slici 5 prikazan je životni ciklus aluminija.



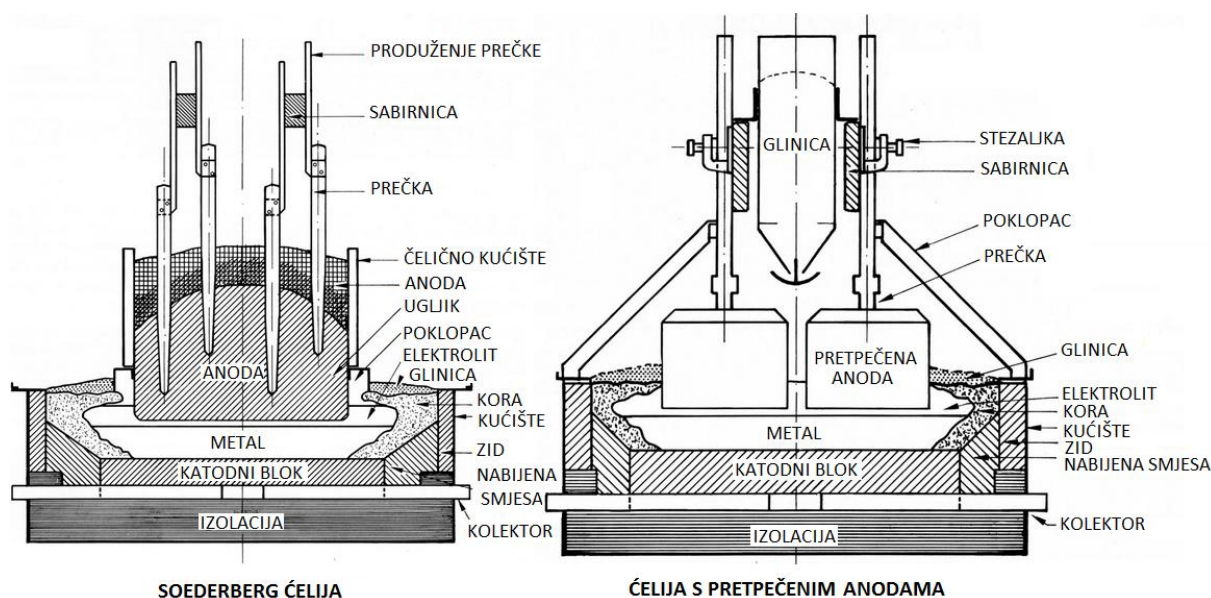
Slika 5. Ciklus proizvodnje aluminija

Danas se u svijetu godišnje proizvede više aluminija (oko 45 milijuna tona primarnog) nego svih obojenih metala zajedno. Povećanje znanja o kemijskim i elektrokemijskim procesima koji se odvijaju u tvornicama aluminija, bilo je omogućeno promjenama koje su učinjene u kemijskom sastavu kupke. Neki su fluoridi u malim i ograničenim količinama dodani u kupku s namjerom sniženja njene temperature i povišenja učinkovitosti elektrolitičkog procesa. Aluminijski fluorid ( $\text{AlF}_3$ ) je najčešći dodatak i danas praktički sve ćelije rade s jednim viškom sadržaja aluminijskog fluorida u odnosu na sadržaj istog u kriolitu. Kupka uvijek sadrži i izvjesnu količinu kalcijevog fluorida ( $\text{CaF}_2$ ), koji uglavnom potječe od kalcijevog oksida ( $\text{CaO}$ ), koji se nalazi kao nečistoća u glinici, ali se također u nekim slučajevima kalcijev fluorid hotimično dodaje u kupku. Prema Faradayevom zakonu elektrolize, jedan Faradej elektriciteta (26,8 Ah) bi trebao teorijski proizvesti jedan gram-ekvivalent aluminija (9,0 g). Međutim, u praksi se obično proizvede između 85 i 95 % od te količine metala. Glavni gubitak u iskorištenju struje je uzrokovan re-oksidacijom tekućeg aluminija s ugljičnim dioksidom.

Razvoj tehnološkog postupka išao je putem usavršavanja konstrukcije ćelije, mehaniziranjem i automatiziranjem pojedinih radnih operacija posluživanja ćelija, računalnim upravljanjem pojedinim tehnološkim parametarima, te osuvremenjivanjem organizacije rada. Usavršavanje Hall-Heroult-ovog postupka najviše se odražavalo na razvoj (sniženje) specifičnog potroška električne energije po jedinici proizvedenog aluminija, pa se zato razvoj tog postupka može kvantificirati upravo prikazom potroška energije. Prva tvornica aluminija izgrađena od strane P. Heroult-a 1889. godine u Froges-u (Francuska) imala je ćelije veličine od svega 1000 A, u



kojima se ostvarivao potrošak energije od čak 100 kWh/kg Al. Tri godine kasnije već su ugrađene ćelije od 4000 A, koje su uz srednji napon od 8 V ostvarivale potrošak energije od 40 kWh/kg Al, a 1898. godine u radu su ćelije od 9000 A sa 6 V po ćeliji i uz potrošak energije od 25 kWh/kg Al. Od tada pa sve do 1924. godine nije ostvaren skoro nikakav napredak u razvoju Hall-Heroult-ovog postupka. Te se godine u Norveškoj ugrađuju prve ćelije sa Söderberg kontinuiranom anodom, čija je dominacija nad dotadašnjim ćelijama s predpečenim anodama trajala više od 30 godina. Söderberg ćelije su tada predstavljale veliki tehnički napredak, pa se je u njima oko 1930. godine ostvarivao specifični potrošak energije iznosa 20-21 kWh/kg Al uz napon ćelije od 5-6 V. Ove su ćelije nakon II. svjetskog rata doživjele veoma intenzivnu industrijsku primjenu, a 1955. godine konstruirane su Söderberg ćelije reda veličine 100000 A, pa je tada izgledalo, da će ovaj tip ćelije potpuno nadvladati u svijetu. Međutim, danas su Söderberg ćelije definitivno izgubile utakmicu sa svojim prethodnim takmacem, tj. sa ćelijama s predpečenim anodama i to zbog činjenice što su ove potonje mnogo prilagodljivije za procese regulacije i automatizacije, što imaju niži napon za oko 0,35 V, te što su “sklonije” skladnom egzistiranju s okolinom. Danas suvremene ćelije s predpečenim anodama rade s jakošću struje od preko 500000 A uz napon ćelije od 4-4,5 V, iskorištenje struje od 95-96 % i uz potrošak istosmjerne električne energije od 13-13,5 kWh/kg Al. Na slici 6 prikazane su dvije osnovne vrste ćelija koje se koriste za elektrolizu.



Slika 6. Čelije za elektrolizu

Suvremena ćelija za redukciju glinice sastoji se od pravokutnog čeličnog sanduka, obično sa strana obloženog s termičko-izolacijskim vatrostalnim materijalima. Unutar toga, na dnu se nalazi obloga od predpečenih ugljenih blokova, u koje su uklopljene čelične katodne šine za prihvatanje električne struje. Toplinska izolacija je podešena tako da se ostvaruje dobra termička



ravnoteža ćelije. Bočna ugljena obloga zaštićena je od agresivnog tekućeg elektrolita skrtnutom kupkom, dok je na katodnom dnu ćelije, rastaljeni aluminij u izravnom kontaktu s ugljenim blokovima. Što se tiče konstrukcije ćelije, treba reći da je ona principijelno ostala ista, onakva kako su je na samom početku razvoja koncipirali Hall i Heroult. Naravno, u praktičnoj realizaciji, pred oko 100 godina utemeljen princip, doživio je velika usavršavanja. Danas u industrijskoj praksi egzistiraju dva osnovna tipa ćelija. Jedan je tzv. Söderberg tip, koji se karakterizira jednom masivnom anodom, u kojoj se električnom i toplinskom energijom iz ćelije, dodavana sirova anodna masa (predstavlja smjesu petrolkoksa i smole katrana kamenog ugljena) koksira ostvarujući monolitnu neprekidnu anodu. Söderbergov tip ćelije ne omogućava drastične izmjene u konstrukciji uvjetovane sve oštrijim zahtjevima za zaštitu radnog mjesta i ljudskog okoliša, kao i zahtjevima za visokim stupnjem automatizacije pri vođenju tehnološkog procesa, koji bi rezultirao u povećanoj produktivnosti ćelije i u znatnom povišenju iskorištenja energije. Drugi tip ćelije je zatvorena ćelija, u kojoj se anoda sastoji od većeg broja (tipično 20, ali i više) prethodno pečenih anodnih blokova, obješenih na anodnom okviru i uronjenih u elektrolit, koji je zajedno sa slojem proizvedenog tekućeg aluminija smješten u katodnom ugljenom koritu.

Tehnološki proces se odvija u međupolnom razmaku (tipično 4-5 cm) između donje površine anode i gornjeg nivoa sloja tekućeg aluminija. Kod ovih najmodernijih ćelija glinica se automatski dodaje sustavom točkastog doziranja. Budući da su ćelije unutar hale elektrolize međusobno spojene u seriju, istosmjerna električna struja (tipične jakosti iznad 100 kA) vodi se između njih pomoću aluminijskih vodiča, a zatim do međupolnog razmaka (i od njega) preko vodiča od željeza odnosno ugljena, zavisno od temperature i funkcije odgovarajućeg dijela ćelije. Pad napona na svakoj ćeliji iznosi 4-4,5 V, tako da suvremena serija ćelija može imati do oko 300 instaliranih jedinica, koje apsorbiraju raspoloživi napon ispravljačke stanice od cca 1500 V.

### 3. SVOJSTVA ALUMINIJA I ALUMINIJEVIH LEGURA

Pod važna svojstva tehničkog aluminija i njegovih legura spadaju: osrednja tvrdoća i čvrstoća, umjerena krutost, mala masa, dobra duktilnost, niska dinamička izdržljivost, dobra strojna obradljivost, otpornost na koroziju, recikličnost, reflektivnost, električna i toplinska vodljivost.

Čisti aluminij je mekan, duktilan i korozijski otporan metal koji se primjenjuje u elektronici u proizvodnji poluvodičkih komponenti, primjenjuje se za dobivanje visokosjajnih površina (efekt zrcala), koristi se i kao konstrukcijski materijal pri izgradnji nuklearnih reaktora. Njegova visoka otpornost na atmosferske prilike omogućuje primjenu kod izrade raznih boja i prevlaka. U tablici 1 prikazana su fizikalna svojstva čistog aluminija.

Tablica 1. Fizikalna svojstva čistog aluminija

Temperatura tališta, °C	660
Gustoća pri 20°C, kg/m <sup>3</sup>	2700
Koeficijent linearnog istezanja, (0-100°C), °C <sup>-1</sup>	$23,5 \cdot 10^{-6}$
Specifični toplinski kapacitet, (0-100°C), J kg <sup>-1</sup> °C <sup>-1</sup>	920
Koeficijent toplinske provodljivosti, (0-100°C), Wm <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>	240
Specifični električni otpor, (20°C), Ωmm <sup>2</sup> m <sup>-1</sup>	0,03
Modul elastičnosti, (20°C), N/mm <sup>2</sup>	71900

Legiranjem aluminija prvenstveno se poboljšavaju mehanička svojstva, ponajprije vlačna čvrstoća i tvrdoća ali je moguće unaprijediti i druga svojstva kao što su krutost, istezljivost, ponekad žilavost ili livljivost. No, potrebno je uzeti u obzir da se legiranjem snižava toplinska i električna vodljivost. Svojstva aluminijevih materijala mogu varirati u širokom rasponu kao rezultat kemijskog sastava i mikrostrukturnog stanja na koje je moguće utjecati toplinskom obradom. Postupkom toplinskog očvrnuća moguće je proizvesti Al-legure čvrstoće poput nekih čelika. Al-legure su povoljnog omjera čvrstoće i gustoće, dobro podnose kako niske tako i umjereno povišene temperature.

## **Tvrdoća**

Tvrdoća je otpornost materijala prema prodiranju nekog drugog znatno tvrdog tijela ili otpornost prema plastičnoj deformaciji. Tvrdoću aluminijske legure je moguće povećati hladnom deformacijom ili toplinskim postupcima očvršćivanja. Toplinska obrada je vrlo bitna jer se konstrukcijski dijelovi često oblikuju iz metala u relativno „mekom“ stanju, a zatim se toplinski obrađuju radi povećanja tvrdoće kako bi udovoljili eksploatacijskim zahtjevima.

## **Čvrstoća**

Čvrstoća je sposobnost materijala da se opire deformaciji i podnese naprezanja bez pojave loma. Čisti aluminij nema visoku vlačnu čvrstoću (oko 90 MPa) ali legiranjem s elementima kao što su mangan, silicij, bakar ili magnezij čvrstoća mu se povećava i dostiže čak do 690 MPa za neke toplinski obradljive legure.

## **Granica razvlačenja**

Granica razvlačenja je ono naprezanje prema kojem se uz odabrani stupanj sigurnosti utvrđuje dopušteno naprezanje u radu strojnog dijela ili elementa konstrukcije. Uz čvrstoću, granica razvlačenja je svojstvo materijala koje određuje mehaničku otpornost u uvjetima djelovanja konstantnog opterećenja kratkotrajnog karaktera. Ne smije se dogoditi da naprezanje prijeđe vrijednost granice razvlačenja zbog pojave plastične (trajne) deformacije koja na kraju može dovesti do loma materijala. Čisti aluminij je jako duktilan materijal i njegova granica razvlačenja iznosi od 7-11 MPa, dok za aluminijske legure varira između 200 i 600 MPa.

## **Modul elastičnosti**

Youngov modul elastičnosti predstavlja mjeru krutosti materijala. Veličina ove elastične konstante izravno ovisi o čvrstoći veze između strukturnih jedinica u kristalnoj ili amorfnoj strukturi. Ako je veza čvrsta onda je i vrijednost modula elastičnosti visoka i materijal se ponaša kruto. Modul elastičnosti čistog aluminijske legure iznosi oko 70 GPa.

## **Gustoća**

Sa gustoćom od  $2700 \text{ kg/m}^3$ , aluminij je najlakši od svih metala u širokoj upotrebi, gotovo je 3 puta lakši od čelika. Reduciranje mase proizvoda je velik korak u smanjenju emisija štetnih plinova i povećanju energetske efikasnosti proizvoda. Mala masa doprinosi ne samo kod primjene već i kod rukovanja u procesu proizvodnje.

## **Specifična čvrstoća**

Niska gustoća aluminija ( $2700 \text{ kg/m}^3$ ) osigurava vrlo dobar omjer čvrstoće i gustoće posebno kada se radi o toplinski očvrstivoj leguri. U pogledu specifične čvrstoće visokočvrste Al-legure konkurentne su čvršćim ali i težim Ti-legurama i čelicima.

## **Duktilnost**

Duktilnost je svojstvo materijala da podnese plastičnu deformaciju bez loma. Materijal je duktilniji što se više može trajno razvući, saviti ili uviti bez pojave pucanja. Aluminij je 6. najduktilniji metal. Al legure nisu krhke pri niskim temperaturama, dapače, snižavanjem temperature postaju čak i čvršće bez znatnijeg gubitka duktilnosti i žilavosti.

## **Strojna obradljivost**

Al se najlakše strojno obrađuje od svih metala. On je lako obradljiv za većinu postupaka strojne obrade i potrebno je uložiti relativno malu količinu energije za obradu glodanjem, bušenjem, rezanjem, vučenjem, valjanjem, savijanjem i sl. Zahvaljujući plošno centriranoj kubičnoj (FCC) strukturi koja sadrži više kliznih ravnina aluminij i njegove legure izvrsno su oblikovljive u toplom i hladnom stanju i lako se obrađuju postupcima kovanja, valjanja, prešanja i sl. i pri tome očvršćuju. Visokočvrste Al-legure moguće je oblikovati u relativno mekanom stanju i potom toplinski obraditi do visokih iznosa čvrstoće.

## **Otpornost na koroziju**

Korozija je ireverzibilni proces dugotrajnog razaranja materijala uslijed djelovanja agresivnog medija. Kod aluminijskih i njegovih legura formiranje zaštitnog sloja oksida pruža otpornost u većini agresivnih uvjeta što svrstava aluminij u sam vrh korozijski postojanih materijala.

## **Recikličnost**

Aluminij je metal koji može reciklirati praktično beskonačan broj puta. Recikličnost aluminijskih legura je svojstvo koje posljednjih godina sve više dolazi do izražaja. U zadnjih 20 godina udio ovog aluminijskog materijala u ukupnoj proizvodnji iznosi preko 30%.

## **Taljivost**

Taljivost je svojstvo materijala koje omogućuje metalu da se rastali dovođenjem topline. Predstavlja važnu značajku prilikom oblikovanja materijala lijevanjem. Temperatura tališta ovisi o vrsti materijala i za aluminij ona iznosi oko 660 °C što omogućuje ekonomski isplativ postupak ljevanja. Zbog niskog tališta temperaturna granica dugotrajne uporabe aluminijskih legura je ograničena na 120 do 150°C, kratkotrajno se aluminij i njegove legure mogu izložiti temperaturama 200 do 260°C.

## **Reflektivnost**

Aluminij je izuzetno reflektivan i odbija svjetlost tako da njegova reflektivnost iznosi 71% u nepoliranom i čak 97% za polirano stanje.

## **Električna i toplinska provodljivost**

Svojstvo materijala koje označava mogućnost provođenja topline ili električne struje. Toplinska vodljivost je posebno važno svojstvo materijala pri zavarivanju. Aluminij s provodnošću od 240 W/mK spada u metale koji najbolje provode toplinu.

## 4. MEHANIZMI OČVRSNUĆA

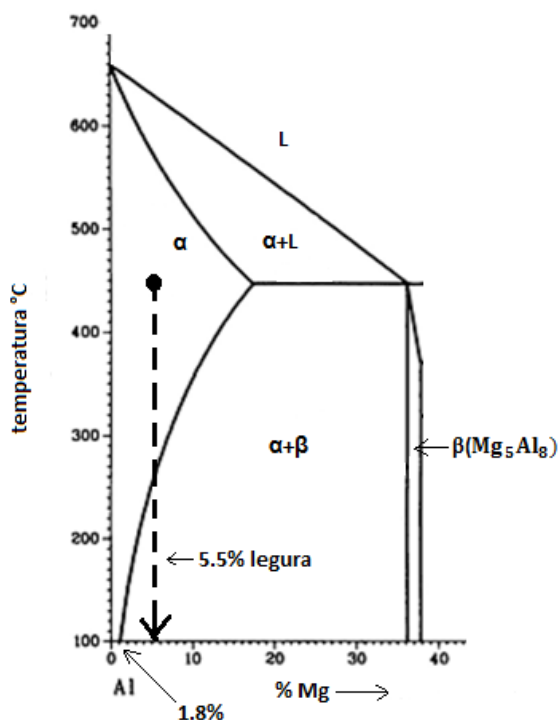
### 4.1. Očvršnuće kristalima mješancima (legiranjem)

Do očvršćivanja dolazi otapanjem legirnih elementa u osnovnom metalu kada oni formiraju čvrstu otopinu. Otopljeni atomi odstupaju od atoma osnovnog metala u veličini, krutosti i električnom naboju. Zbog toga nasumično raspoređeni atomi legirnih elemenata u interakciji s dislokacijama uzrokuju očvršnuće otežavajući i sprečavajući gibanje dislokacija. Teorija očvršćivanja legiranjem je prilično komplicirana ali se mogu predvidjeti orijentacijske vrijednosti granice razvlačenja kako sljede:

$$Re \propto \epsilon_s^{3/2} C^{1/2}$$

gdje je C koncentracija otopine,  $\epsilon_s$  je izraz koji predstavlja nesrazmjer između atoma osnovnog metala i otopljenih atoma. Rezultat ovog izraza je upravo onakav kakav se očekuje: loše primljeni atomi jače otežavaju gibanje dislokacija nego oni dobro primljeni, velika količina legirnih atoma bolje će spriječiti gibanje dislokacija od male količine.

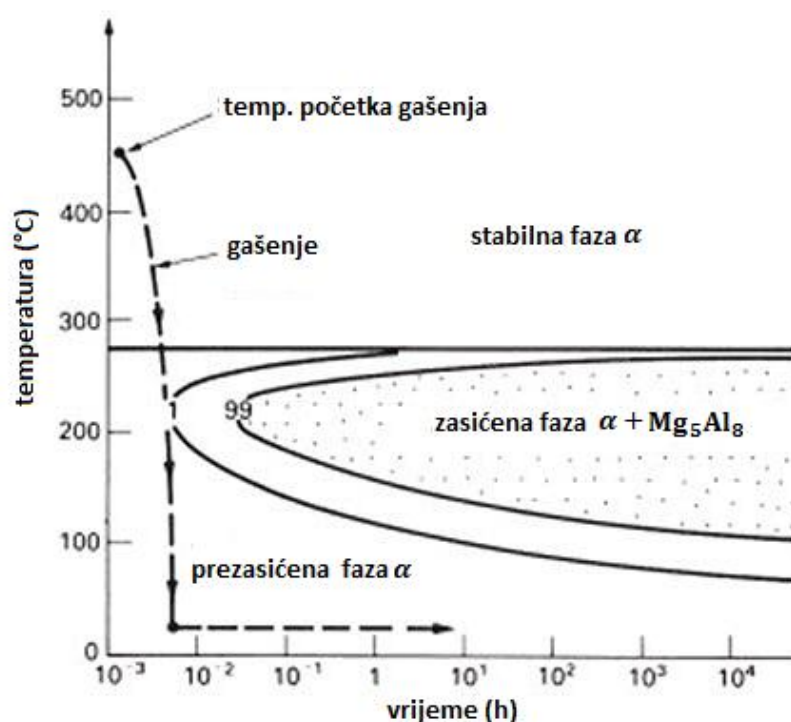
Od svih aluminijskih legura serija 5000 generira svoju čvrstoću upravo iz očvršćivanja čvrste otopine. Fazni dijagram Al-Mg pokazuje zašto: na sobnoj temperaturi u aluminiju se može otopiti do 1,8% magnezija u ravnotežnom stanju, slika 7. U praksi Al-Mg legure mogu sadržavati do 5,5% magnezija u čvrstoj otopini pri sobnoj temperaturi tako da je stupanj prezasićenosti  $5,5 - 1,8 = 3,7\%$  mase.



Slika 7. Fazni dijagram Al-Mg

Kako bi se postiglo ovo prezasićenje potrebno je provesti sljedeće faze toplinske obrade:

- rastopno žarenje pri 450°C (homogenizacija) - legura s 5,5 % Mg prelazi u jednofazno područje ( $\alpha$ ) gdje se sav Mg otapa u aluminiju formirajući zamjenske kristale mješance.
- umjereno brzo hlađenje do sobne temperature - Fazni dijagram pokazuje da ispod temperature 275°C, legura s 5,5% Mg ima ravnotežno strukturu koja se sastoji od dvije faze,  $\alpha + \text{Mg}_5\text{Al}_8$ . Ako se legura polako hladi ispod 275°C, atomi Al i Mg međusobno difundiraju tvoreći precipitate intermetalnog spoja  $\text{Mg}_5\text{Al}_8$ . Međutim, ispod 275°C difuzija je spora i C krivulja precipitacijske reakcije je pomaknuta u desno kako pokazuje slika 8.



Slika 8. TTT dijagram precipitacije  $\text{Mg}_5\text{Al}_8$  za čvrstu otopinu Al-5,5% Mg

Ako se legura s 5,5% Mg hladi umjereno brzo izbjeci će nos C krivulje. Mg tada neće stići izaći iz čvrste otopine i izlučiti se u obliku  $\text{Mg}_5\text{Al}_8$  precipitata već će na sobnoj temperaturi nastati prezasićena čvrsta otopina. Tablica 2 prikazuje prezasićenje Mg koje se značajno odražava na porast granice razvlačenja. Očvršćivanje kristalima mješancima nije ograničeno samo na Al legure serije 5000. Legura drugih serija također imaju elemente otopljene u čvrstoj otopini i sve su one očvrsnute do nekog stupnja.

Tablica 2. Granica razvlačenja Al-legura serije 5000 (Al-Mg)

Legura	% Mg	Granica razvlačenja (MPa) (u žarenom stanju)	
5005	0,8	40	
5050	1,5	55	
5052	2,5	90	Prezasićene
5454	2,7	120	
5083	4,5	145	
5456	5,1	160	

No, većina Al legura duuguje svoju čvrstoću sitnim precipitatima intermetalnih spojeva i očvršnuće legiranjem nije tako dominantno kao kod legura serije 5000. Od drugih materijala, najčešće je korišteno kod titanove legure (TiAl6V4) koja je prvenstveno očvršnuta kristalima mješancima (Ti otapa oko 7% Al uz potpunu topljivost V). U konačnici, Mg legure mogu biti očvršnute legiranjem sa Li, Al, Ag i Zn koji se otapaju u Mg u količini između 2 i 5%.

#### 4.2. Očvršnuće deformacijom

Komercijalno čisti aluminij (serija 1000) i toplinski neobradive aluminijske legure (serije 3000 i 5000) su većinom hladno očvršnute. Deformacijsko očvršnuće zajedno s otvrdnjavanjem kristalima mješancima (legiranjem) rezultira značajno većom čvrstoćom, tablica 3.

Tablica 3. Granica razvlačenja za aluminijske legure očvrstive hladnom deformacijom

Oznaka legure	Granica razvlačenja MPa		
	Žareno	„Polutvrdo“	„Tvrdo“
1100	35	115	145
3005	65	140	185
5456	140	300	370

Očvršnuće deformacijom se ostvaruje hladnim valjanjem. Granica razvlačenja se povećava s porastom stupnja deformacijom prema izrazu:

$R_e = A \cdot \epsilon_s^n$ , gdje su A i n konstante. Za Al legure n leži između 1/6 i 1/3.



### 4.3. Precipitacijsko očvršnuće

Čisti aluminij je metal s relativno niskom čvrstoćom tako da u najčišćem obliku ima vlačnu čvrstoću od samo  $40 \text{ N/mm}^2$  i granicu razvlačenja od  $10 \text{ N/mm}^2$ . Za većinu tehničkih primjena to je prenisko pa se osim hladnog oblikovanja i legiranja za očvršnuće aluminija koristi i precipitacijsko otvrdnjavanje. Precipitacijsko očvršćivanje putem dozrijevanja ili starenja vrsta je toplinske obrade gdje se izlučuju izdvojene faze u osnovnoj strukturi metala. Prva praktična primjena precipitacije vezuje se uz 1906. godinu i znanstvenika Alfreda Wilma. Učinak precipitacije uzrokovan je činjenicom da jedan ili više određenih elemenata mogu oblikovati čestice, takozvane intermetalne spojeve. Ove čestice čine defekte kristalne rešetke i ovisno o veličini čestica, njihovom udjelu i raspodjeli uzrokuju porast čvrstoće i tvrdoće. Kako bi se neka Al-legura mogla precipitacijski očvršnuti moraju biti ispunjeni određeni polazni uvjeti:

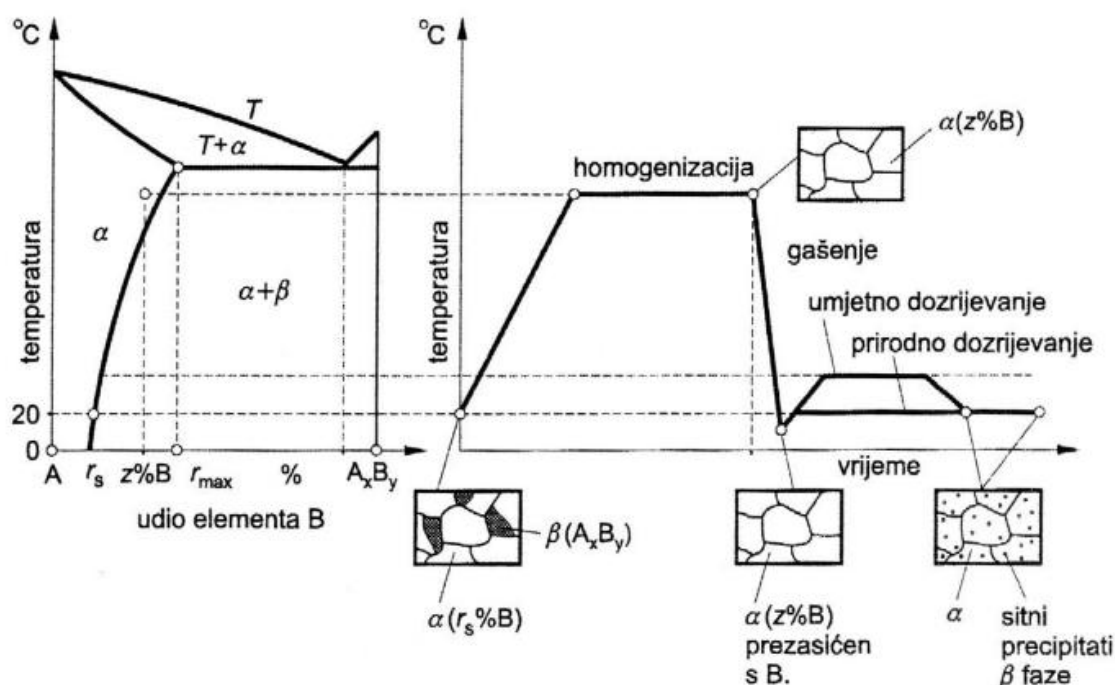
1. legura mora sadržavati barem jedan legirni element ili konstituent u onom području dijagrama stanja u kojem njegova topljivost u aluminiju raste s porastom temperature,
2. maseni udio legirnog elementa mora biti što viši, ali ne smije prekoračiti granicu maksimalne topljivosti u kristalu mješancu aluminija, kako bi se mogla postići potpuna apsorpcija stranih atoma rastvornim žarenjem,
3. legirni elementi ili konstituenti moraju imati značajnu topljivost pri visokoj temperaturi i samo minimalnu topljivost na okolišnoj temperaturi. Elementi koji se tako ponašaju jesu Cu, Zn, Si i Mg koji tvore konstituente kao što su  $\text{CuAl}_2$ ,  $\text{Mg}_2\text{Si}$ ,  $\text{MgZn}_2$ ,
4. element ili konstituent koji se otapa mora omogućiti formiranje sitnih precipitata koji deformiraju kristalnu rešetku aluminijeve matrice. Zato legura u polaznom stanju mora biti takvog sastava da sadrži heterogenu strukturu sačinjenu od  $\alpha$  kristala mješanaca aluminija i kristala druge faze u obliku nekog intermetalnog spoja ( $\text{CuAl}_2$ ,  $\text{Mg}_2\text{Si}$ ,  $\text{MgZn}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{CuMg}$ ,  $\text{Al}_3\text{Mg}_2$ ) kako bi tijekom promjena koje se zbivaju, došlo do ponovnog izlučivanja intermetalnog spoja, ali sada u koherentnom obliku. Precipitacijom jednoliko raspršenih čestica koje otežavaju gibanje dislokacija dolazi do postupnog otvrdnjavanja legure. Neke Al-legure očvršćuju nakon samo nekoliko dana držanja pri sobnoj temperaturi- postupak poznat kao prirodno dozrijevanje, dok druge umjetno dozrijevaju pri povišenim temperaturama. Legure koje zadovoljavaju navedene uvjete su toplinski očvrstljive legure za gnječenje serija 2XXX, 6XXX, 7XXX i neke legure serije 8XXX.

Postupak precipitacijskog očvršnuća u osnovi se sastoji od tri faze:

1. zagrijavanja legure do temperature rastopnog žarenja i njezinog držanja na toj temperaturi dovoljno dugo vremena kako bi se legirni elementi potpuno otopili,
2. nadkritičnog hlađenja (gašenja) do sobne temperature kako bi legirni elementi ostali prisilno zarobljeni u čvrstoj otopini čime dolazi do njenog prezasićenja,
3. dozrijevanja prirodnog ili umjetnog čime dolazi do izlučivanja vrlo sitnih precipitata unutar aluminijske matrice.

Kod precipitacijskog očvršćivanja dolazi do variranja topljivosti atoma legirnih elemenata u  $\alpha$  mješancu. Porast čvrstoće i tvrdoće direktno je povezan sa stvaranjem koherentnih precipitata unutar rešetke  $\alpha$  kristala mješanca aluminija.

Opći postupak precipitacijskog očvršćivanja prikazuje slika 9.



Slika 9. Opći postupak precipitacijskog očvršćivanja

Legura koja sadrži neki legirni element B zagrijava se u postupku rastopnog žarenja na dovoljno visoku temperaturu pri kojoj se legirni element otapa u čvrstoj otopini. Čestice intermetalnog spoja potpuno će se apsorbirati u kristalu mješancu aluminija ako se legura s  $X\%$  elementa B, koja polazno sadrži  $\alpha$  kristale mješance aluminija u kojima je otopljeno  $r_s\%$  elementa B i neku intermetalnu fazu  $\beta (A_xB_x)$  zagrije na dovoljno visoku temperaturu. Pri tome dolazi do stvaranja homogene čvrste otopine koja sadrži samo  $\alpha$  kristale u kojima je otopljeno  $X\%$  elementa B. Velika difuzijska pokretljivost atoma omogućuje zasićenje rešetke  $\alpha$  mješanaca

atomima elementa B i prazninama. Da bi došlo do zasićenja, temperatura rastopnog žarenja mora biti iznad krivulje topljivosti u čvrstom stanju, ali ne smije doći do taljenja. Ako je temperatura previsoka i granice zrna se počnu taliti, izradak je nepovratno uništen. Primjerice, legura 2024 rastopno se žari u području temperatura 488-498 °C, dok je eutektička temperatura (502 °C) samo 4 °C viša od gornje temperaturne granice rastopnog žarenja. S druge strane, ako je temperatura preniska, otapanje neće biti potpuno i legura dozrijevanjem neće ostvariti očekivanu čvrstoću. Vrijeme rastvornog žarenja mora biti dovoljno dugo da legura difuzijom postigne ravnotežno stanje. Ono može varirati od jedne minute i manje kada je riječ o tankim limovima, pa sve do 20 sati kod velikih lijevanih proizvoda. Peći u kojima se provodi rastvorno žarenje trebaju biti čiste i suhe. Prisutnost vlage može dovesti do apsorpcije vodika u aluminijev izradak, dok sumporni spojevi također mogu razlaganjem površinskog oksidnog sloja povećati difuziju vodika. U tom pogledu najosjetljivija je serija 7XXX, a potom slijede legure serije 2XXX. Vлага se može ukloniti čišćenjem i sušenjem dijelova prije stavljanja u peć.

Nakon otapanja legirnih elemenata u otopini, legura se mora gasiti na relativno nisku temperaturu kako bi ovi elementi ostali zarobljeni u čvrstoj otopini. Kada bi se, primjerice, legura s X% elementa B sporo hladila do okolišne temperature, ravnoteža bi se postigla pri svakoj temperaturi i čestice intermetalnog spoja izlučivale bi se kao nekoherentni precipitati. Time bi se ponovno formirala polazna  $\alpha+\beta$  mikrostruktura koja bi uzrokovala slaba mehanička svojstva, te bi legura u ovom stanju bila prilično krhka zbog prisutnosti velikih čestica intermetalne faze. Zato je leguru potrebno brzo hladiti (gasiti) s temperature rastvornog žarenja čime se legirni elementi zadržavaju prisilno otopljeni u  $\alpha$  kristalu mješancu tvoreći prezasićenu čvrstu otopinu. Zbog prezasićenja, tj. znatno većeg udjela legirnog elementa u  $\alpha$  čvrstoj otopini od ravnotežne koncentracije, legura se nalazi u neravnotežnom stanju. Primjerice, za Al-leguru koja sadrži općeniti element B,  $\alpha$  kristali mješanci u gašenom stanju sadrže X% elementa B dok je maksimalna topljivost atoma ovog elementa pri okolišnoj temperaturi u ravnotežnom stanju puno niža i iznosi samo  $r_s$ . Osim prezasićenja atomima legirnih elemenata,  $\alpha$  otopina je prezasićena i prazninama. Sam postupak gašenja predstavlja najosjetljiviju fazu toplinske obrade. Gašenje mora biti dovoljno brzo da bi se legirni elementi zadržali u otopini. U isto vrijeme potrebno je minimizirati zaostala naprezanja uvedena gašenjem koja bi mogla uzrokovati pojavu deformacija i napuklina. Primjenom velikih brzina gašenja općenito se postižu najviše čvrstoće i najbolje kombinacije čvrstoće i žilavosti. Premda se intenzivnijim gašenjem obično poboljšava otpornost prema općoj i napetosnoj koroziji, određene legure serije 7XXX, koje ne sadrže bakar, bit će otpornije na napetosnu koroziju ako se sporije hlade. Velike brzine gašenja ostvaruju se u hladnoj vodi, ali često se primjenjuju i sporija ohlađivanja, npr. u toploj ili vreloj vodi, kojima se djelomično žrtvuje čvrstoća i korozijska otpornost na račun manjih deformacija.

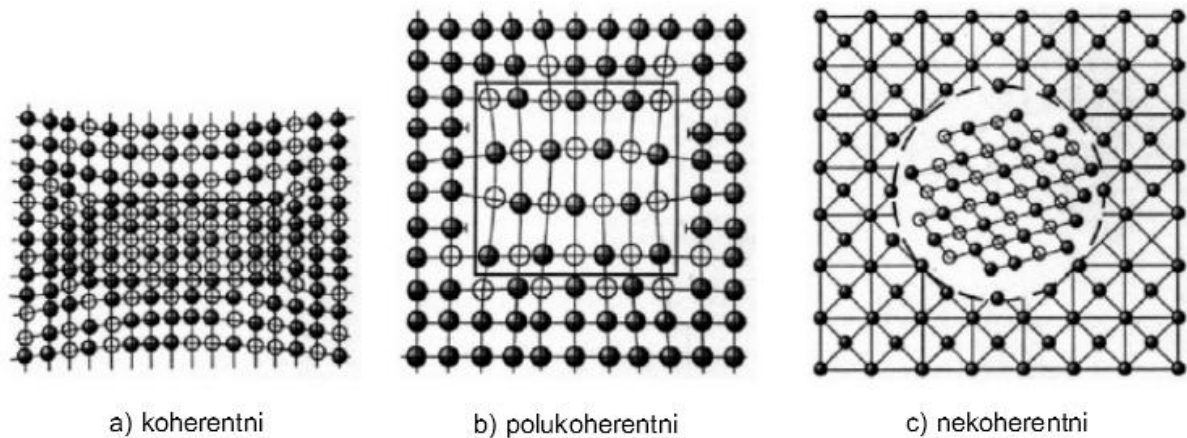
Brzina gašenja dodatno se može povećati miješanjem kojim dolazi do kidanja parnog omotača formiranog oko predmeta u ranoj fazi gašenja. Dijelovi skloni deformiranju zahtijevaju sporije gašenje, primjerice u toploj vodi temperature 65-80 °C. Za gašenje se koriste i vodene otopine polialkilenglikola koji tijekom gašenja proizvode stabilni površinski film koji osigurava ujednačene brzine ohlađivanja i ograničava pojavu deformacija.

Da bi se u postupku gašenja izbjegla preuranjena precipitacija, moraju biti ispunjena dva uvjeta:

- vrijeme koje protekne da se izradak prenese iz peći u sredstvo za gašenje mora biti što kraće da bi se onemogućilo sporo ohlađivanje u području kritičnih temperatura gdje nastupa vrlo brza precipitacija,
- spremnik za gašenje mora biti dovoljno velikog volumena kako bi se izbjegao osjetniji rast temperature sredstva za gašenje što također može rezultirati preuranjenom precipitacijom.

Nakon gašenja Al-legure se lako hladno oblikuju. Zato se zakovice koje služe za spajanje konstrukcijskih dijelova zakivaju odmah nakon gašenja. Zakovice se moraju oblikovati prije dozrijevanja jer kad očvrsnuće jednom započne, svaki pokušaj zakivanja zakovice rezultirat će njenim raspucavanjem.

Nakon rastopnog žarenja i gašenja slijedi dozrijevanje koje se provodi na temperaturi okoline (prirodno dozrijevanje) ili nekoj povišenoj temperaturi (umjetno dozrijevanje). Prirodno dozrijevanje traje od nekoliko dana pa sve do nekoliko mjeseci. Umjetno dozrijevanje, pri povišenoj temperaturi 100-200 °C zahtijeva kraći vremenski period, od pola sata do nekoliko dana. Budući da je osnova dozrijevanja difuzija koja se ubrzava porastom temperature, to se umjetnim dozrijevanjem ostvaruje veći porast čvrstoće i tvrdoće nego prirodnim dozrijevanjem. U prvom stadiju dozrijevanja atomi legirnih elemenata nastoje izaći iz čvrste otopine tako da zaposjedaju položaje unutar rešetke  $\alpha$  mješanaca tvoreći klice (nukleuse) budućih čestica. Atomi legirnih elemenata sele se iz područja veće napetosti rešetke u područja prezasićenosti prazninama i pri tome formiraju nakupine otopljenih atoma unutar rešetke  $\alpha$  mješanaca. Te klice prisutne su kao koherentni precipitati koji imaju istovjetan raspored atoma kao i matrica te nema prekida veza u kristalnoj rešetki. Međutim, atomski razmaci su dovoljno različiti da se rešetka deformira na način prikazan slikom 10a.

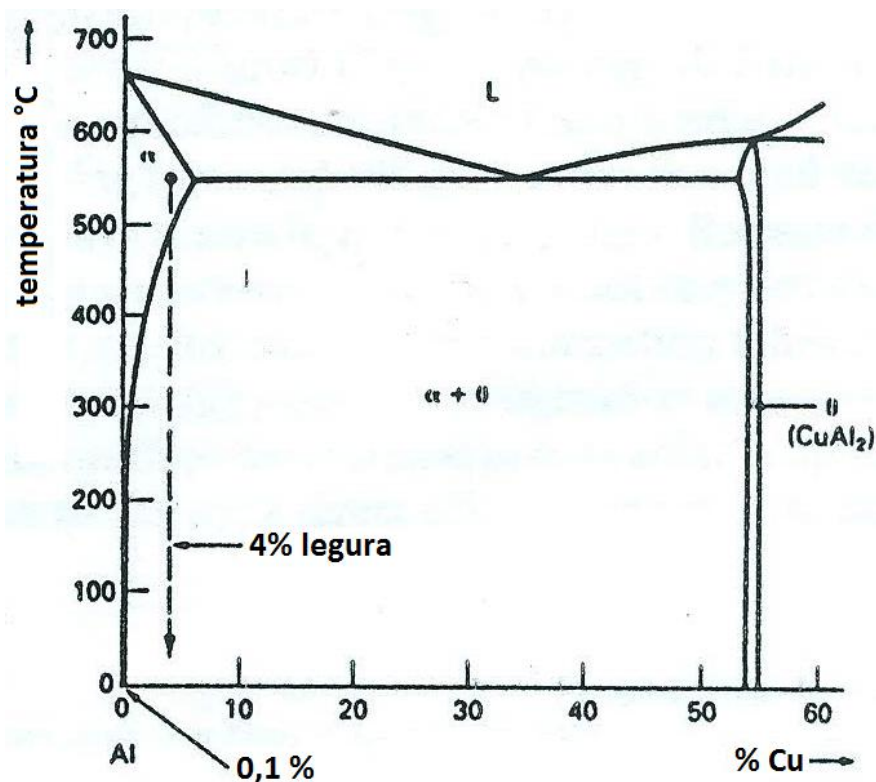


Slika 10. Tipovi precipitata

Uslijed izvitoperenosti rešetke dolazi do pojave unutarnjih naprezanja koja ometaju i usporavaju gibanje dislokacija što za posljedicu ima porast čvrstoće i tvrdoće. Također se povećava i istezljivost jer više nema velikih čestica krhke intermetalne faze. U postupku umjetnog dozrijevanja može doći do mjestimičnog prekida veza između matrice i precipitata pri čemu nastaje polukoherentni precipitat povezan s matricom samo na nekim čvorovima rešetke (slika 10b). Izlučivanje ovih polukoherentnih precipitata moguće je samo pri povišenim temperaturama. Kod prirodnog dozrijevanja ovog stadija nema. Ako se legura zagrije na još višu temperaturu, zbog ubrzane difuzije mikrostruktura se brzo vraća u ravnotežno stanje i koherentne i polukoherentne čestice prelaze u nekoherentni precipitat odvojen od matrice, slika 10c). Time iščezava deformacija kristalne rešetke, precipitati rastu i sjedinjuju se međusobno, što rezultira daljnjim padom čvrstoće i tvrdoće uz zadržavanje niske istezljivosti.

#### 4.4. Precipitacija Al-Cu legura (duraluminija)

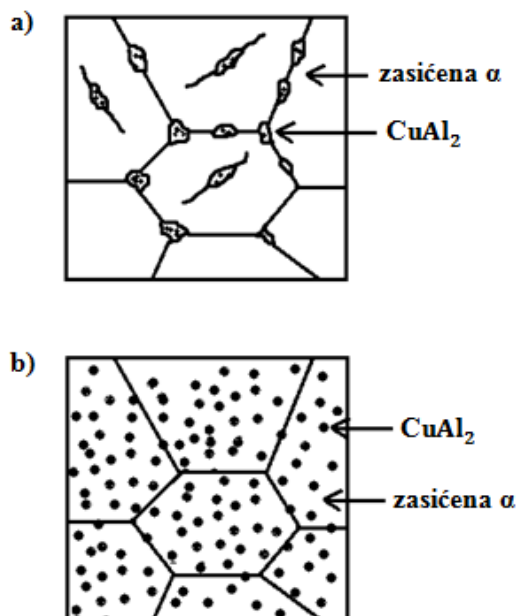
Kada fazni dijagram ima oblik kao na slici 11 (topljivost u čvrstom stanju izrazito opada snižavanjem temperature), tada postoji potencijal za očvršćivanje dozrijevanjem (ili precipitacijom).



Slika 11. Al-Cu fazni dijagram

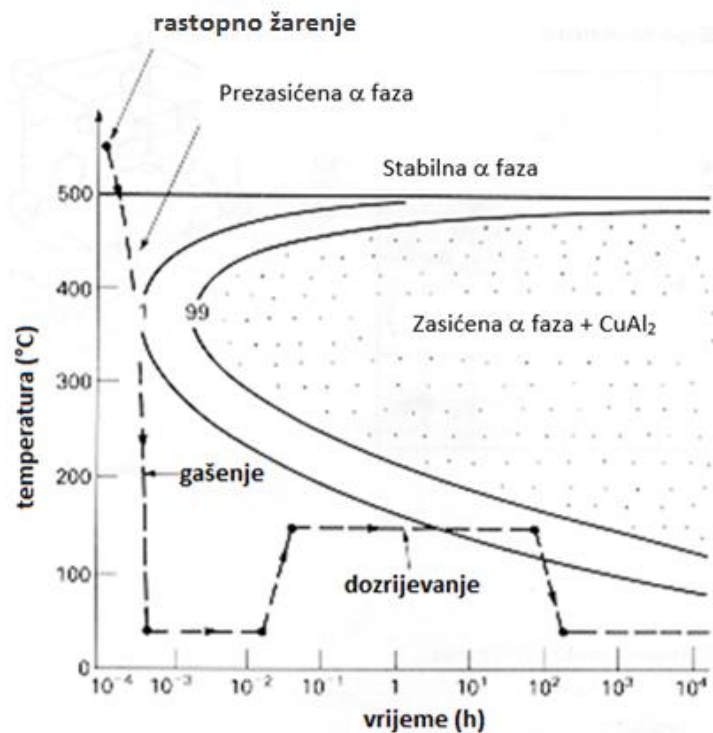
Klasični primjer za to je duraluminij (Al legura serije 2000) koji sadrži oko 4% bakra. Iz dijagrama stanja Al-Cu jasno je vidljivo da ova legura na temperaturi između 500°C i 580°C sadrži jednu fazu: Cu se otapa u Al i tvori zamjenskeα kristale mješance. Ispod 500°C legura ulazi u dvofazno područje  $\alpha + \text{CuAl}_2$ . Kako temperatura opada povećava se udio  $\text{CuAl}_2$  i pri sobnoj temperaturi ravnotežna otopina sadrži 93%  $\alpha$  kristala i 7%  $\text{CuAl}_2$  kristala. Slika 12.a) prikazuje mikrostrukturu Al legure s 4% Cu sporo hladene s 550 °C do sobne temperature. Kod sporog hlađenja pokretačka sila za precipitaciju je mala i brzina nukleacije je niska. Kako bi se postigao ravnotežno udjel  $\text{CuAl}_2$  nekoliko klica koje se formiraju izrastaju u veće, prilično razmaknute precipitate. Gibanje dislokacija tako nije previše spriječeno i legura je prilično meka.

Ako pak, leguru nadkritično hladimo tj. gasimo postiže se mnogo sitnija struktura, slika 12. b). Zbog velike pokretačke sile brzina nukleacije je visoka. Precipitati, iako maleni, prilično su blizu jedan drugom i izrazito otežavaju gibanje dislokacija te očvršćuju leguru.



Slika 12. Mikrostrukture pri sobnoj temperaturi za Al+4%Cu leguru a) sporo hladeno s 550 °C - precipitati su krupni i izrazito udaljeni, b) brzo hladeno s 550 °C - precipitati su sitni i zbijeni

Postoje i ograničenja kod precipitacijskog očvršćivanja vezana uz brzinu ohlađivanja: ako je brzina prevelika ne dostiže se vrh (nos) C krivulje za precipitacijsku reakciju i ne dolazi do stvaranja precipitata. No moguće je veliko povećanje čvrstoće i tvrdoće kroz postupak naknadnog dozrijevanja, slika 13.



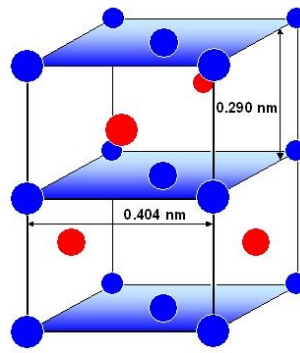
Slika 13. TTT dijagram precipitacije CuAl<sub>2</sub> (Al+ 4% Cu)

Za precipitacijsko očvršćivanje Al legure s 4% Cu potrebni su sljedeći koraci toplinske obrade:

- rastopno žarenje na 550 °C pri čemu se sav Cu otapa u čvrstoj otopini;
- brzo hlađenje do sobne temperature gašenjem u vodi ili ulju čime se izbjegava nos C krivulje i formira prezasićena čvrsta otopina na sobnoj temperaturi;
- držanje na 150 °C u trajanju od 100 sati (dozrijevanje). Kao što slika 13 prikazuje prezasićeni  $\alpha$  kristali se transformiraju u ravnotežnu mješavinu zasićenih  $\alpha$  kristala i intermetalne faze CuAl<sub>2</sub>. To se događa uz izrazito veliku pokretačku silu kojom nastaju vrlo fine (i vrlo čvrste) strukture. Zbog toga što se transformacija odvija pri niskoj temperaturi, gdje atomi nisu izrazito pokretni, proces izlučivanja CuAl<sub>2</sub> nije lak.

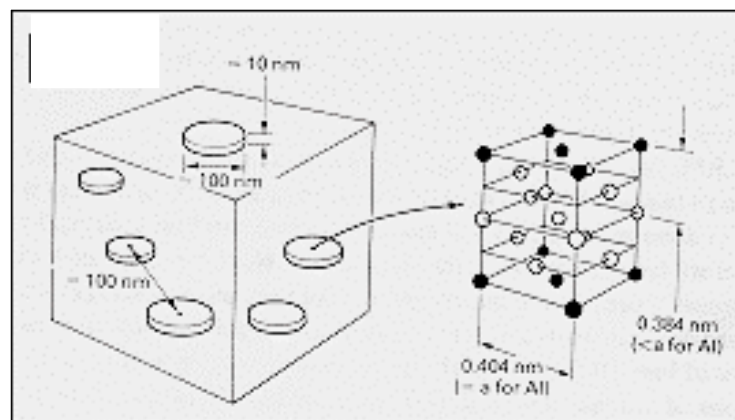
Zapravo, transformacija se odvija u četiri izdvojene faze prikazane na slici 14. Svaka od ovih faza ima direktan utjecaj na granicu razvlačenja.



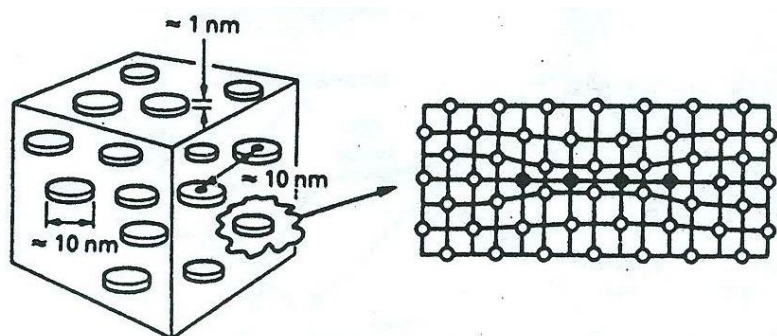


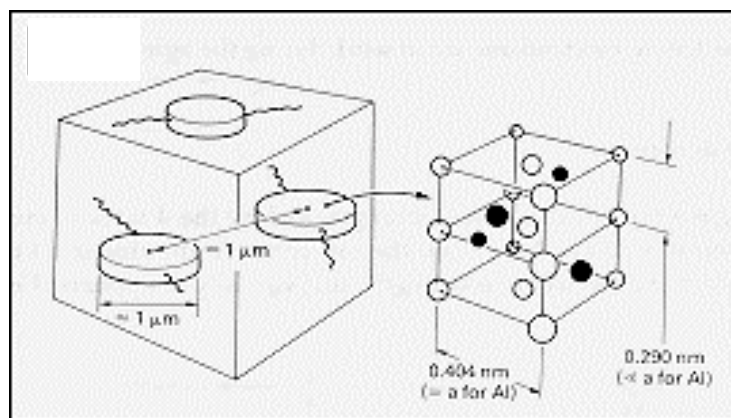
a) Prezasićena  $\alpha$  faza

b) Guinier-Preston (GP) zone

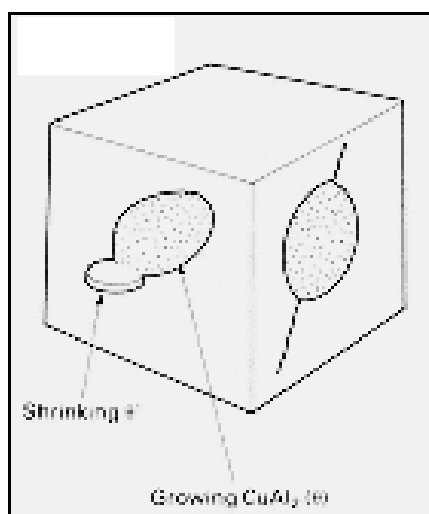


c)  $\theta''$





d)  $\theta'$



e)  $\text{CuAl}_2$  ( $\theta$ )

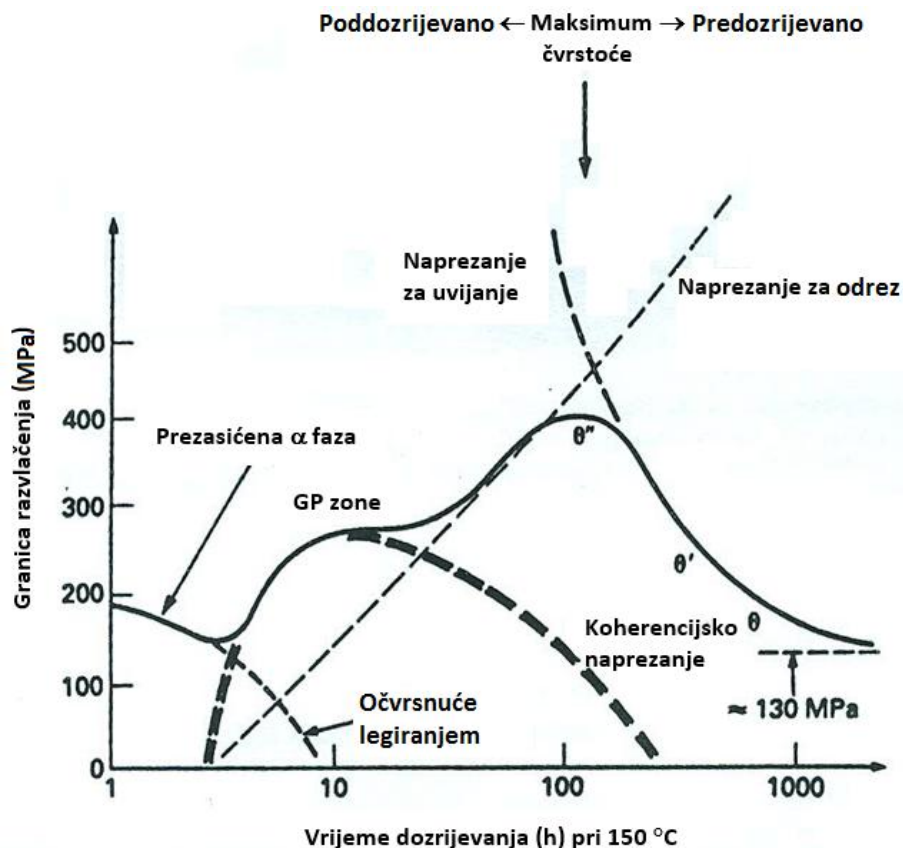
Slika 14. Stupnjevi precipitacije za Al-Cu leguru

Iz prezasićene čvrste otopine, slika 14a) prvo nukleiraju Guinier-Preston (GP) zone oblika diska, slika 14b). Površine diska su savršeno koherentne s matricom. Rubovi diska su također koherentni ali uz veliku koherentnu deformaciju. Neke od GP zone rastu i formiraju  $\theta''$  precipitate, slika 14c). Preostale GP zone se otapaju i disociraju Cu u rastuće  $\theta''$  precipitate. Površine diskova su savršeno koherentne. Rubovi diskova su koherentni ali se ne slažu s parametrima rešetke  $\theta''$  i Al matrice generirajući koherentnu deformaciju. Na dislokacijama matrice nukleiraju  $\theta'$  precipitati, slika 14d).  $\theta''$  precipitati se otapaju i disociraju Cu u rastući  $\theta'$ . Površine diskova su još uvijek savršeno koherentne sa matricom, ali rubovi diskova nisu koherentni. Ni površine ni rubovi ne pokazuju koherentnu deformaciju ali iz različitih razloga. Nadalje,  $\theta'$  precipitati se otapaju i formiraju se ravnotežne  $\text{CuAl}_2$  ( $\theta$ ) nukleuse na granicama zrna i međupovršinama  $\theta'$  matrice.  $\theta$  precipitati rastu i potpunosu nekoherentni s matricom. Zbog toga rastu kao zaobljene čestice, a ne više u obliku diska.

Postoje 4 zasebna mehanizma u procesu dozrijevanja:

a) Očvršćivanje čvrste otopine

Na početku dozrijevanja legura je umjereno očvršnuta s 4% Cu koji je zarobljen u prezasićenoj  $\alpha$  fazi. Ali kada se formiraju GP zone, gotovo sav Cu se uklanja iz otopine i očvršnuće virtualno nestaje, slika 15.



Slika 15. Ovisnost granice razvlačenja gašene Al legure s 4% Cu

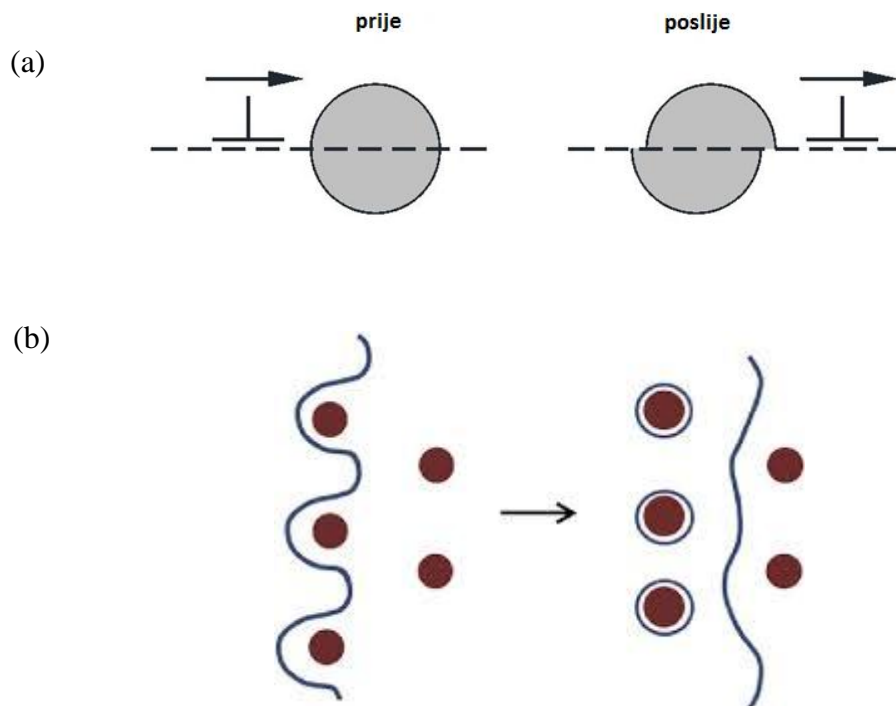
b) Očvršćivanje koherencijskim naprezanjem

Koherencijske deformacije oko GP zona i  $\theta''$  precipitata generiraju naprezanja koja sprečavaju gibanje dislokacija. GP zone daju veći efekt očvršnuća.

c) Precipitacijsko očvršćivanje

Precipitati direktno sprečavaju gibanje dislokacija, ali njihova učinkovitost je ograničena iz dva razloga; dislokacije mogu prolaziti kroz precipitate ili ih zaobilaziti, slika 16.

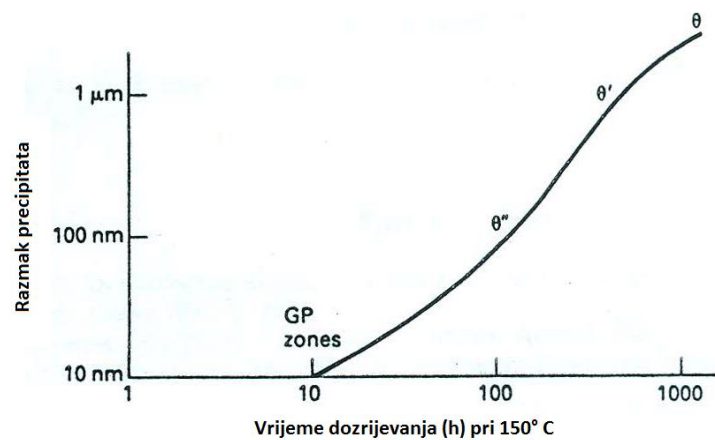
Otpor odrezu precipitata ovisi o brojnim faktorima od kojih je otpor smicanju rešetke precipitacitata samo jedan od njih. U biti naprezanje za odrez raste s vremenom dozrijevanja. (vidi sliku 15)



Slika 16. Dislokacije mogu savladati precipitate

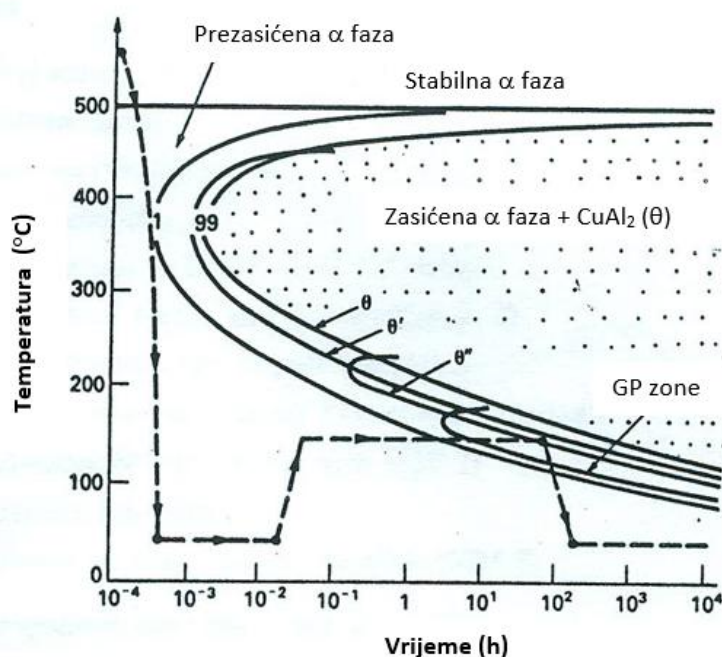
(a) presjecanjem ili (b) uvijanjem oko precipitata

Uvijanje je lakše što su precipitati udaljeniji. Tijekom dozrijevanja razmak između precipitata raste od 10 nm do 1  $\mu\text{m}$  i više, slika 17. Zato se naprezanje za uvijanje smanjuje s vremenom dozrijevanja.



Slika 17. Stupnjevito povećanje razmaka između čestica s vremenom dozrijevanja

Četiri mehanizma očvršnuća daju značajne varijacije granice razvlačenja kako je prikazano slikom 15. Maksimalna čvrstoća se doseže transformacijom u  $\theta''$ . Ako se pusti da legura dozrijeva još neko vrijeme čvrstoća se snižava i jedini način povratka čvrstoće predozrijevanje legure je ponovno zagrijavanje na 550 °C, gašenje i dozrijevanje. Ako legura nije dozrijevana dovoljno dugo, neće dosegnuti maksimalnu čvrstoću, ali ovo se lakše ispravlja dodatnim dozrijevanjem. Premda je izabrano dozrijevanje na 150 °C legura se mogla dozrijevati na bilo kojoj temperaturi ispod 180°C (slika 18). Niža temperatura dozrijevanja zahtjeva dulje trajanje dozrijevanja kako bi se dosegla maksimalna čvrstoća. U praksi, trajanje dozrijevanja mora biti dovoljno dugo da bi se proces lako mogao kontrolirati a opet ne smije biti predugoi time preskupo.



Slika 18. TTT dijagram za Al leguru s 4% Cu

## 5. PRIMJENA ALUMINIJA I NJEGOVIH LEGURA

Aluminij i njegove legure se zbog svojih izuzetnih svojstava kao što su povoljan omjer čvrstoće i gustoće, otpornost na koroziju, dobra livljivost i oblikovljivost i strojna obradljivost koriste u strojogradnji (tlačne posude, cjevovodi i izmjenjivači topline), graditeljstvu (nosive konstrukcije, krovni pokrovi, vrata, prozori, rolete), elektrotehnici, industriji vozila, brodogradnji, optici, prometu (putokazi i prometni znakovi), prehrambenoj industriji (pakiranjima) itd.

### 5.1. Primjena u graditeljstvu

Kad je masa konstrukcije temeljno pitanje, aluminij može predstavljati valjanu alternativu čeliku. Velika je prednost i ta što nema potrebe za održavanjem konstrukcije ako se ona nalazi u vlažnom okolišu. Konstrukcijske primjene u području graditeljstva su sljedeće;

- krovni sustavi velikih raspona kod kojih su promjenjiva opterećenja mala u odnosu na stalna opterećenja,
- konstrukcije koje se nalaze u vlažnom i korozivnom okolišu: krovovi bazena, riječni mostovi, nadgrađa offshore postrojenja, slika 19.



Slika 19. Platforma za helikopter



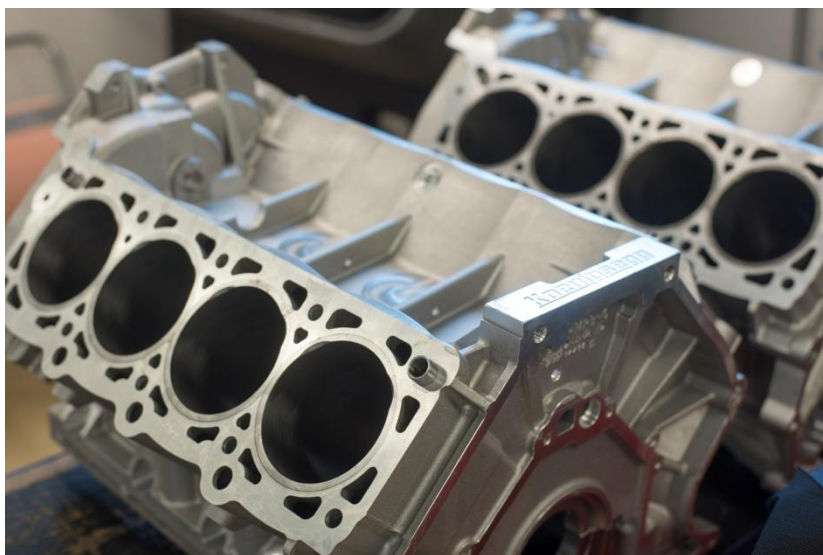
- za konstrukcijske primjene smještene daleko na terenu, gdje su veliki troškovi transporta i lakoća montaže je od iznimne važnosti (dalekovodi i sl.),
- razne pokretne konstrukcije kao što su pokretni mostovi, krovovi i dizalice gdje mala masa znači uštedu energije,
- kod konstrukcija posebnih namjena gdje su radovi održavanja posebno zahtjevni i moraju se ograničiti (razni rasvjetni stupovi, antenski tornjevi itd.),
- kod konstrukcija za staklene fasade na zgradama,
- kod konstrukcija u morskom okolišu, slika 20.



Slika 20. Pješački most „Yanchep“ u Australiji

## 5.2. Primjena u industriji motornih vozila

Podvozja, karoserije, blokovi motora i sl. danas se učestalo proizvode od aluminija i njegovih legura. Procjenjuje se da smanjenje od 100kg na masi automobila donosi uštedu od 0,6 l/ 100km, smanjuje se emisija štetnih plinova i trajanje vremena kočenja, poboljšava se upravljivost, a automobili s velikim udjelom aluminija u masi imaju i bolju apsorpciju kinetičke energije pri eventualnom sudaru. Slika 21 prikazuje aluminijski blok motora.



Slika 21. Aluminijski blok motora

### 5.3. Primjena u brodogradnji

Uporaba aluminija i njegovih legura u brodogradnji svakodnevno se povećava zahvaljujući njihovim svojstvima a to su mala masa i korozijska postojanost. Napredne legure omogućile su dizajn brzih brodova olakšavajući trup do 50% mase u odnosu na čelični. Korozijska otpornost kao važno svojstvo privlači sve više brodograditelja pa se aluminij počinje sve više koristiti i za nadgrađa jahti, kruzera pa čak i trgovačkih brodova. Na slici 22. je aluminijski katamaran hrvatske proizvodnje.

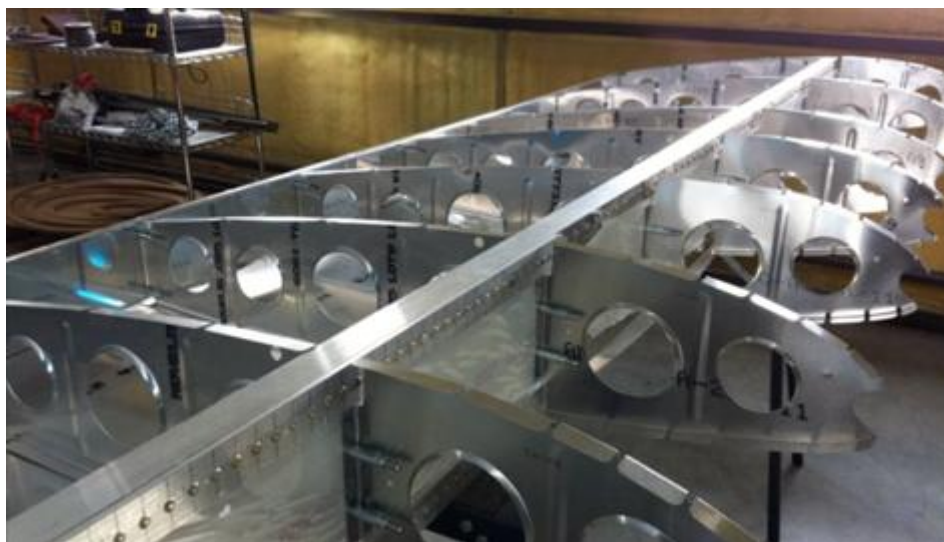


Slika 22. Aluminijski katamaran



#### 5.4. Primjena aluminija u zrakoplovstvu

Primjena aluminija u zrakoplovstvu veže se uz samo otkriće duraluminija kada su konstruirani prvi zračni brodovi i oplata krila i trupa na zrakoplovima. Aluminijske legure su važan konstrukcijski materijal u modernom zrakoplovstvu. One su materijal koji tradicionalno prevladava u konstrukcijama putničkih i vojnih zrakoplova. Zahvaljujući napretku znanosti i brojnim inovacijama u području inženjerstva materijala razvijene su brojne Al-legure koje se danas upotrebljavaju za izradu raznih dijelova kod zrakoplova. Kod primjene Al-legura, za zrakoplovstvo su najzanimljivije legure iz skupine durala (serija 2XXX) i konstruktala (serija 7XXX). Čvrste aluminijske legure izložene su velikom rasponu tlakova i opterećenja koja su sastavni dio leta zbog učestalih promjena visina; obloge od tankih ploča aluminija drže hladnoću vani, a toplinu unutra. Kod većine današnjih putničkih i transportnih zrakoplova većina interijera se sastoji od aluminija ili aluminijskih kompozita kako bi se smanjila težina, uz to uštedilo gorivo, smanjila emisija štetnih plinova i povećala korisna nosivost. Neki od dijelova napravljenih od aluminijskih legura su naplatci kotača, rebra, oplata krila i trupa, oplata repnih površina, razni strukturni i visokoopterećeni elementi krila itd. Slika 23. prikazuje aluminijsku konstrukciju krila zrakoplova.



Slika 23. Konstrukcija krila

### 5.5. Primjena aluminija u prehrambenoj industriji

Moderni proizvođači pakiranja hrane su veliki potrošači aluminija. Zbog korozijske postojanosti aluminij ne reagira sa hranom pa se koristi pri izradi raznih vrsta folija, tetrapaka, spremnika za hranu i limenki za pića. Na slikama 24. i 25. su prikazani primjeri aluminijske ambalaže.



Slika 24. Aluminijske posude za hranu



Slika 25. Aluminijske limenke

## **6. EKSPERIMENTALNI DIO**

U eksperimentalnom dijelu rada provedeno je precipitacijsko očvršćivanje toplinski obradive Al-legure koje se sastoji od zagrijavanja na temperaturu rastopnog žarenja, držanja legure na toj temperaturi, zatim gašenja u vodi i potom umjetnog dozrijevanja. Nakon precipitacijskog očvršćivanja uzorci su podvrgnuti ispitivanju mikrostrukture, udarnog rada loma, tvrdoće i analize prelomne površine.

### **6.1. Plan eksperimenta**

Plan eksperimenta sadrži sljedeće korake:

1. izrezivanje epruveta za ispitivanje žilavosti i označivanje istih;
2. analiza kemijskog sastava materijala;
3. određivanje parametara rastopnog žarenja i dozrijevanja (temperature i vremena);
4. rastopno žarenje uzoraka i gašenje u vodi;
5. umjetno dozrijevanje na tri različite temperature u različitom vremenskom trajanju uz naknadno hlađenje na zraku;
6. priprema uzoraka za analizu mikrostrukture i mjerenje tvrdoće;
7. ispitivanje udarnog rada loma (žilavosti);
8. mjerenje tvrdoće;
9. analiza prijelomnih površina;
10. određivanje optimalne temperature i vremena dozrijevanja na temelju dobivenih rezultata.

## 6.2. Rezanje uzoraka

Iz Al-ploče dimenzija 400·350·10 mm, izrezane su 33 epruvete dimenzija 10·10·55mm s “V” zarezom na sredini za ispitivanje udarnog rada loma (slika 26). Nakon izrezivanja epruvete su označene brojevima 1-33 kako ne bi došlo do zamjene tijekom kasnijeg rukovanja.



Slika 26. Epruvete nakon označivanja

## 6.3. Ispitivanje kemijskog sastava

Kemijski sastav ispitivane aluminijeve legure određen je kvantitativnom analizom na spektrometru „GDOES, GDS 850A“, proizvođača Leco. Ispitivanje je provedeno u Laboratoriju za analizu metala Fakulteta strojarstva i brodogradnje. Rezultati ispitivanja sažeti su u tablici 4.

Tablica 4. Kemijski sastav ispitivane aluminijeve legure

uzorak	%							
	Si	Fe	Mn	Mg	Cr	Ni	Ti	Al
Sadržaj	0,99	0,29	0,49	0,99	0,03	<0,01	0,012	ostatak

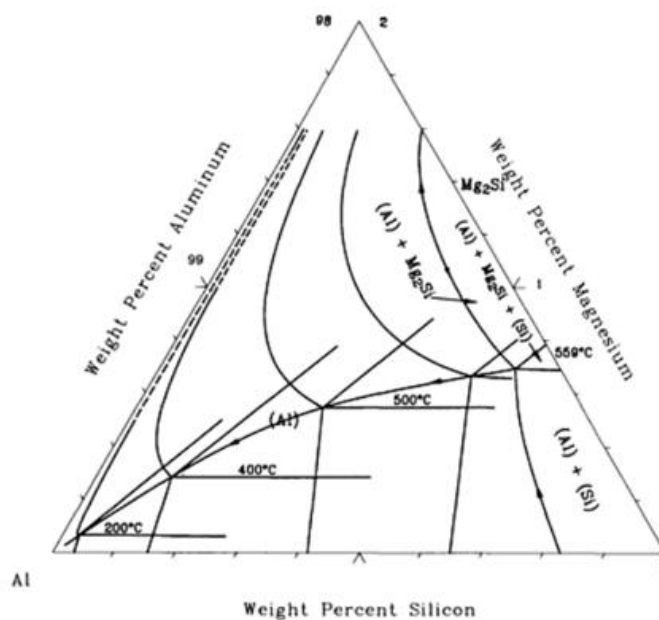
Ispitivanja su pokazala da se radi o Al-leguri koja sadrži 0,99 %Si i 0,99 %Mg oznake AlMg1Si.

## 6.4. Toplinska obrada

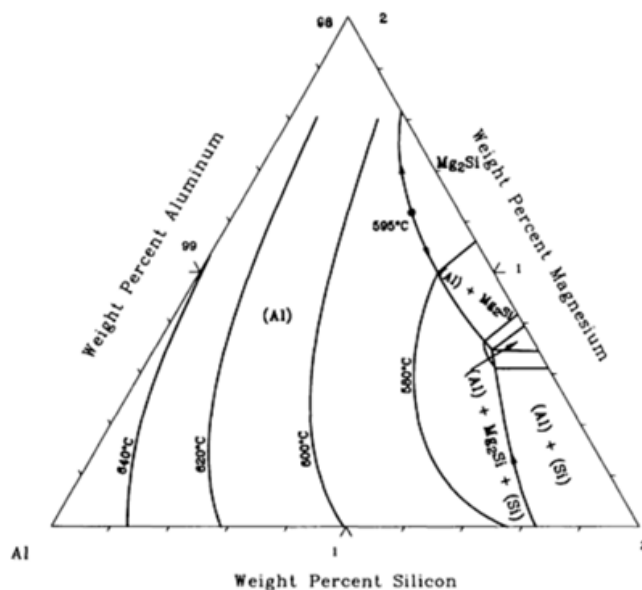
Toplinska obrada uzoraka uključuje zagrijavanje na temperaturu rastopnog žarenja uz naknadno gašenje kako bi se dobila prezasićena čvrsta otopina te potom umjetno dozrijevanje na povišenoj temperaturi.

### 6.4.1. Rastopno žarenje

Parametri rastopnog žarenja određeni su pomoću ternarnog dijagrama stanja sustava Al-Mg-Si prikazanog na slikama 27 i 28.



Slika 27. Ternarni dijagram stanja Al-Mg-Si – projekcija topljivosti



Slika 28. Ternarni dijagram stanja Al-Mg-Si – projekcija solidusa

Pri zagrijavanju legure na temperaturu rastopnog žarenja valja voditi računa o tome da temperatura mora biti iznad krivulje topljivosti u čvrstom stanju, ali mora biti i niža od solidusa kako ne bi došlo do taljenja. Ako se legura zagrije na previsoku temperaturu izradak će biti trajno uništen jer će doći do taljenja granica zrna. Ako je pak temperatura preniska, otapanje neće biti potpuno i legura dozrijevanjem neće ostvariti očekivanu čvrstoću. Na temelju ovih spoznaja i dijagrama na slikama 27 i 28 određena je temperatura rastopnog žarenja 530°C. Homogenizacijsko žarenje provedeno je bez zaštitne atmosfere na zraku.

Rastopno žarenje mora biti dovoljno dugo kako bi legura difuzijom postigla ravnotežno stanje tj. kako bi se otapanjem čestica intermetalne faze postigla potpuna apsorpcija stranih atoma u kristalu mješancu aluminija.

Nakon zagrijavanja peći na potrebnu temperaturu (530 °C) uzorci su stavljeni u peć i držani na ovoj temperaturi 1 sat. Nakon sat vremena slijedilo je nadkritično hlađenje (gašenje) u vodi da bi se legirni elementi prisilno zadržali otopljeni u  $\alpha$  kristalu mješancu aluminija. Time se postiglo željeno neravnotežno stanje tj. prezasićenje  $\alpha$  mješanaca atomima legirnih elemenata i prazninama. Tri uzorka oznake 31, 32, 33 nakon homogenizacije gašena su na zraku kako bi se nalizirao utjecaj brzine hlađenja nakon rastopnog žarenja na mikrostrukturu i svojstva ispitivane legure.

Kod gašenja treba paziti da se uzorci nakon vađenja iz peći što prije urone u vodu kako bi se onemogućilo sporo ohlađivanje u području kritičnih temperatura gdje dolazi do brze precipitacije. Gašenje mora biti dovoljno brzo da se legirni elementi zadrže u otopini, a u isto vrijeme moraju se minimizirati zaostala naprezanja koja nastaju gašenjem, kako bi se spriječila

pojava deformacija i napuklina. Brzina gašenja dodatno se može povećati miješanjem kojim se razbija parni omotač nastao oko uzorka u ranoj fazi gašenja.

#### 6.4.2. Dozrijevanje

Dozrijevanje se zasniva na procesu difuzije a za umjetno dozrijevanje aluminijskih legura to znači zagrijavanje na temperaturu 100 do 200°C kroz vremenski period u rasponu od pola sata do maksimalno nekoliko dana. Kako se difuzija ubrzava povišenjem temperature, umjetnim se dozrijevanjem koje podrazumijeva držanje na povišenoj temperaturi postiže veći porast čvrstoće i tvrdoće nego prirodnim dozrijevanjem na sobnoj temperaturi.

Dozrijevanje uzoraka u komornim pećima (slika 29) provedeno je na tri različite temperature: 130 °C, 160 °C i 190 °C u vremenskom trajanju od 1 h, 4 h i 10 h, tablica 5.



Slika 29. Komorne elektro-peći

Tablica 5. Temperaturno-vremenski režimi dozrijevanja

Uzorak	Temperatura dozrijevanja, °C	Vrijeme držanja, h
1	130	1
2		
3		
4	130	4
5		
6		
7	130	10
8		
9		
10	160	1
11		
12		
13	160	4
14		
15		
16	160	10
17		
18		
19	190	1
20		
21		
22	190	4
23		
24		
25	190	10
26		
27		



## 6.5. Priprema epruveta za ispitivanje mikrostrukture i mjerenje tvrdoće

Za potrebe svjetlosne mikroskopije i kasnije mjerenje tvrdoće bilo je potrebno pripremiti uzorke odnosno izbrusiti, polirati i nagristi, što je napravljeno u Laboratoriju za metalografiju Fakulteta strojarstva i brodogradnje. Brušenje je provedeno na uređaju „Buehler“ (slika 30) s brusnim pločama granulacije 320, 500, 1000, 2000 i 4000 uz obvezno vođeno hlađenje i brzinu vrtnje od 300 o/min pri ručnoj sili pritiska.



Slika 30. Brušilica „Buehler“

Od ukupno 33 epruvete za obradu ih je izdvojeno 11 od čega po jedna za svaki od 9 različitih stanja dozrijevanja i dvije koje nisu dozrijevane već samo rastvorno žarene i hlađene u vodi odnosno na zraku.

Nakon brušenja pristupilo se poliranju uzoraka na uređaju za poliranje „Struers DAP-V“, slika 31. Brzina okretaja iznosila je 150 o/min pri ručnoj sili pritiska, za abraziv je korištena dijamantna pasta veličine abraziva 1 $\mu$ m.



Slika 31. Uređaj za poliranje „Struers DAP-V“

Slika 32 prikazuje brušene i polirane epruvete spremne za sljedeću fazu pripreme, nagrivanje. Nagrivanje je provedeno u otopini „Keller“ u sastavu 2,5% HNO<sub>3</sub>, 1,5% HCl, 1% HF i 95% destilirana voda. U vremenskom trajanju od 30 s nakon čega su uzorci isprani u vodi i osušeni u struji toplog zraka.



Slika 32. Polirane epruvete

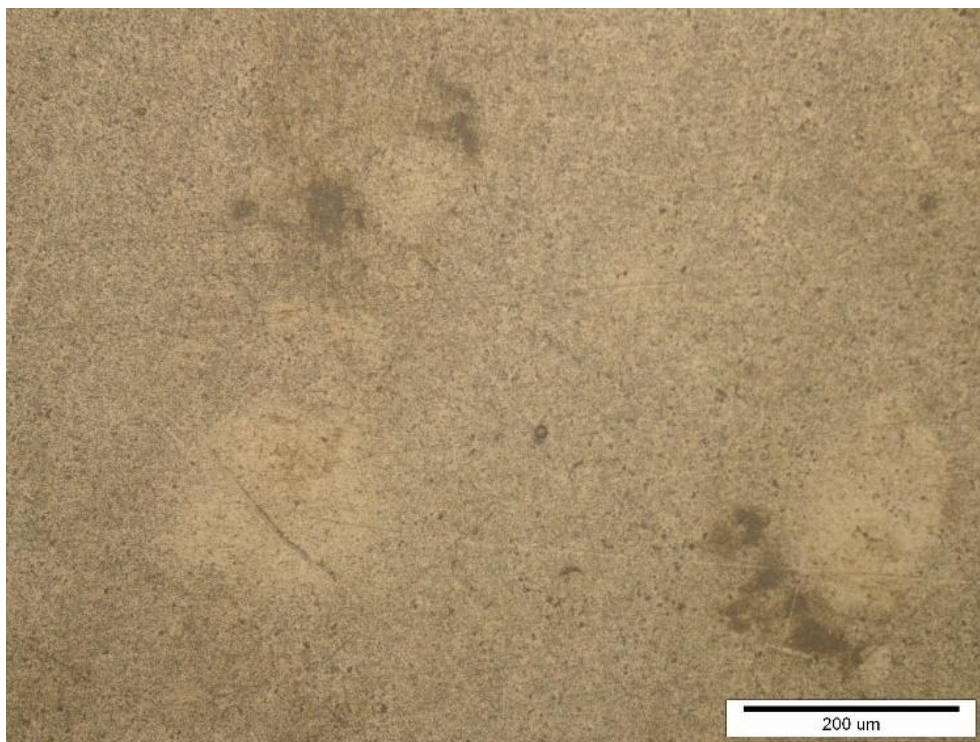
## 6.6. Ispitivanje mikrostrukture

Uzorci su analizirani na svjetlosnom mikroskopu vrste Olympus GX51F-5 s integriranom digitalnom kamerom i pripadajućim računalnim programom za analizu slike, slika 33.

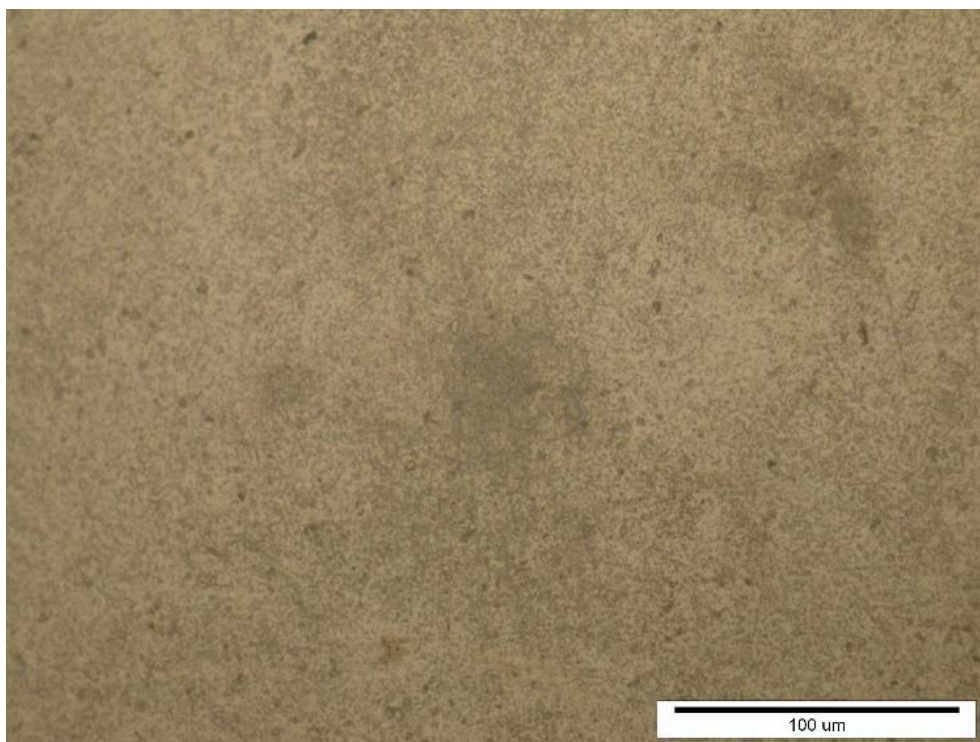


Slika 33. Mikroskop Olympus GX51F-5

Na slikama 34-55 prikazane su mikrostrukture 11 epruveta snimljene pri povećanjima 200x i 500x. Vidljivo je da se promjenom temperature i vremena dozrijevanja javljaju različita mikrostrukturalna stanja s obzirom na udjel i veličinu precipitata izlučenih u  $\alpha$ -matrici. Razlika se vidi već i između uzorka 33 koji je hlađen na zraku i uzorka 30 gašenog u vodi. Kod uzorka 33 je zamjetno da je došlo do nastajanja rijetko raspoređenih krupnijih precipitata koji slabo otežavaju gibanje dislokacija (slike 34 i 35), dok kod uzorka 30 (gašen u vodi) to nije slučaj. Premda ovaj uzorak nakon homogenizacije u pravilu ne bi trebao sadržavati precipitate oni su ipak vidljivi što je posljedica nepotpunog otapanja ili pak preuranjene precipitacije (slike 36 i 37). Mikrostrukture uzoraka 1, 4 i 7 dozrijevanih na 130 °C u trajanju 1, 4 i 10 h vrlo su slične (slike 38 do 43) što upućuje na činjenicu da difuzija pri ovoj temperaturi nije toliko izražena kao pri temperaturama 160 °C i 190 °C gdje se već mogu vidjeti zamjetne mikrostrukturne razlike, napose ako se u obzir uzme i vrijeme dozrijevanja.

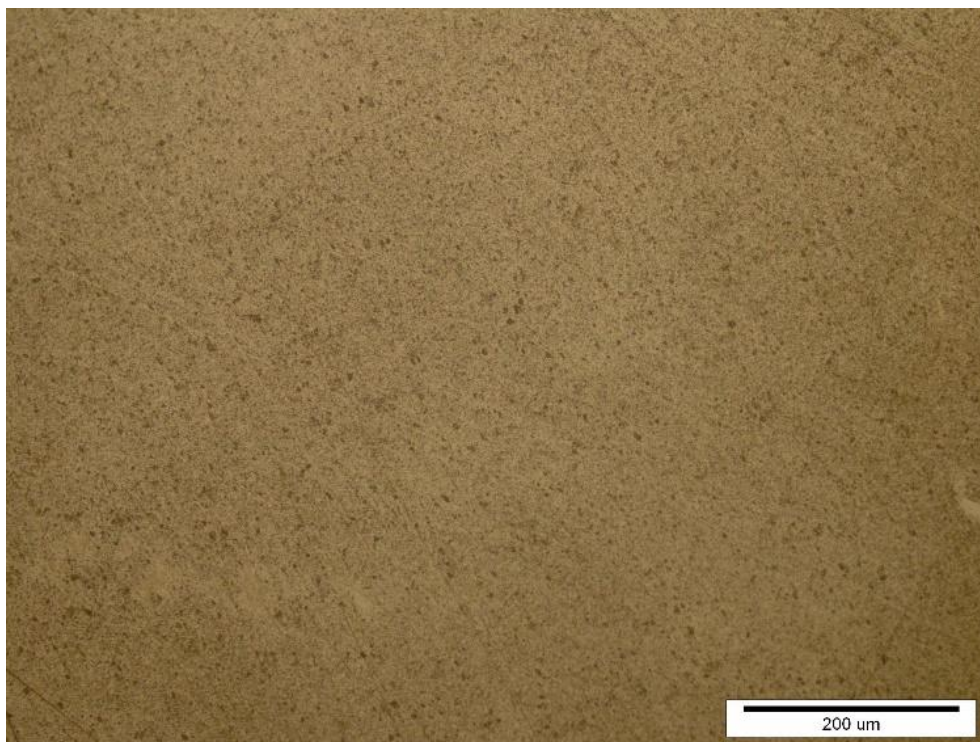


Slika 34. Mikrostruktura uzorka 33 / nedozrijevano, hlađeno na zraku

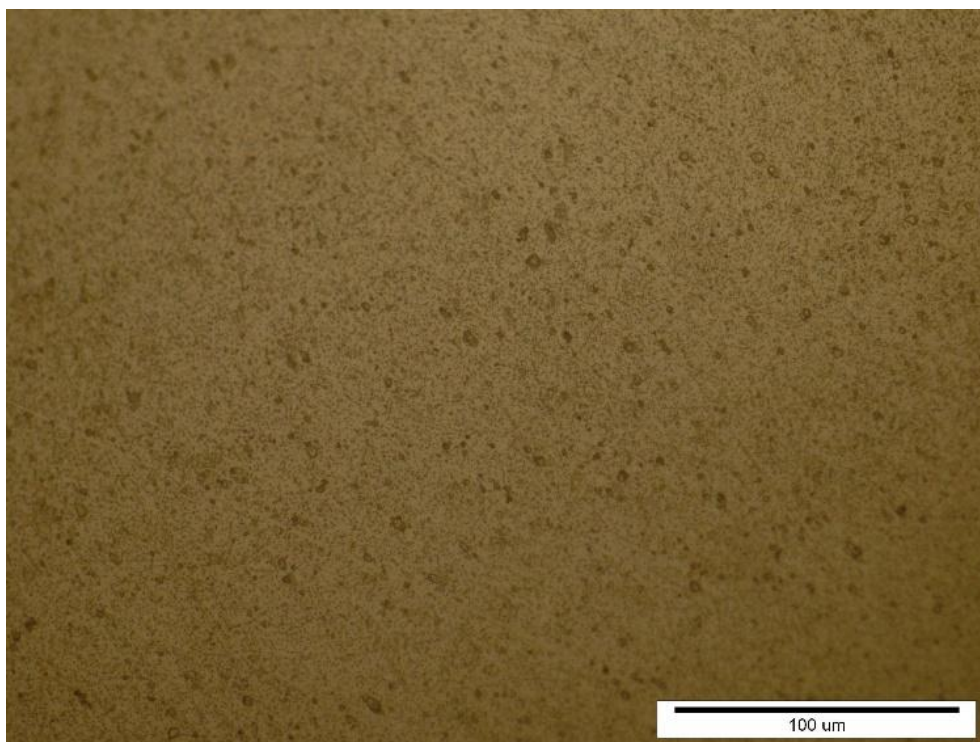


Slika 35. Mikrostruktura uzorka 33 / nedozrijevano, hlađeno na zraku

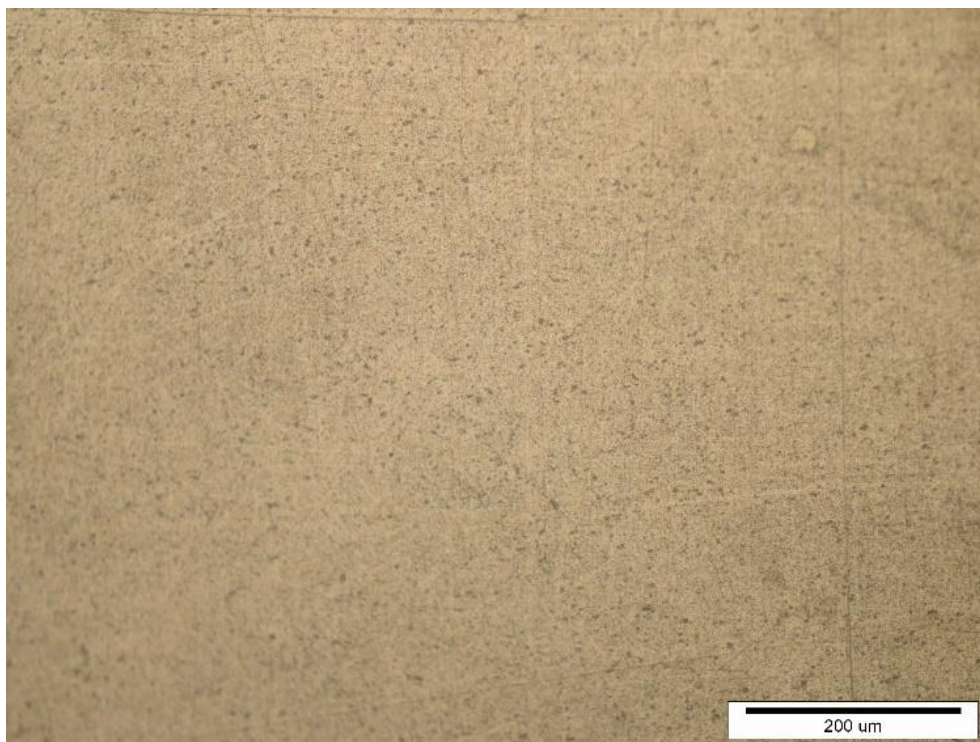




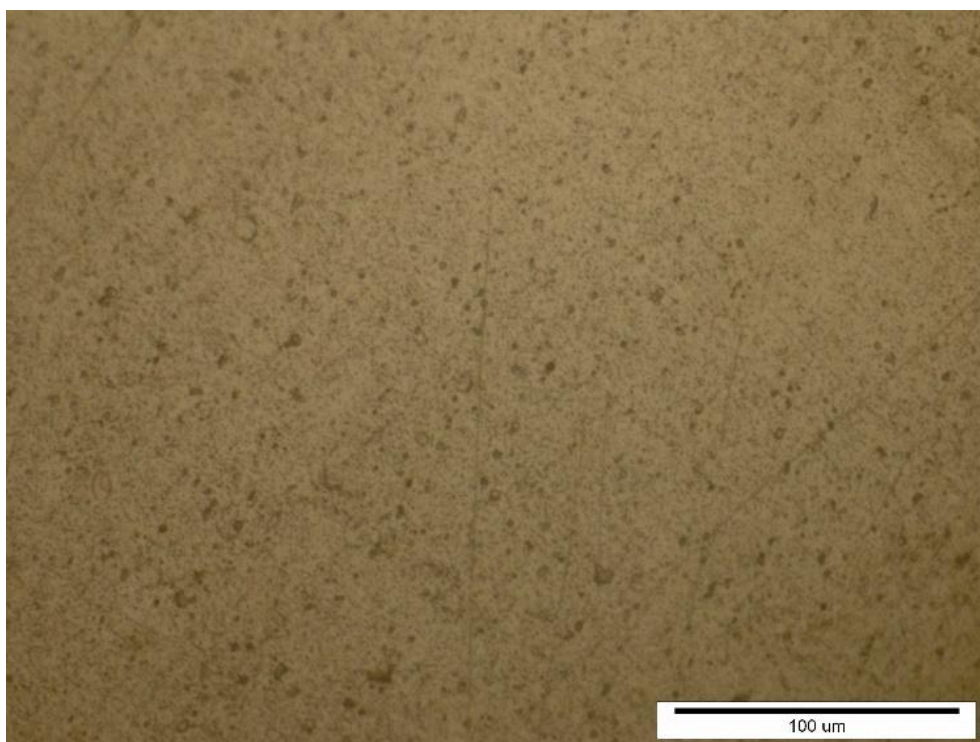
Slika 36. Mikrostruktura uzorka 30/ nedozrijevano, gašeno u vodi



Slika 37. Mikrostruktura uzorka 30/ nedozrijevano, gašeno u vodi

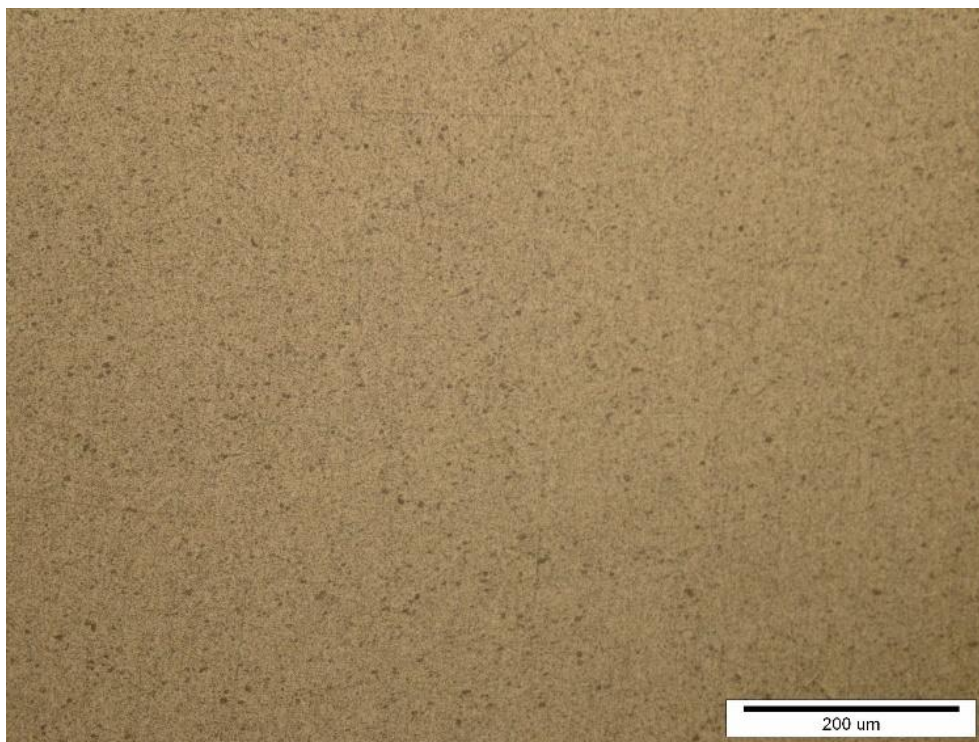


Slika 38. Mikrostruktura uzorka 1/ dozrijevano 1 h pri 130 °C

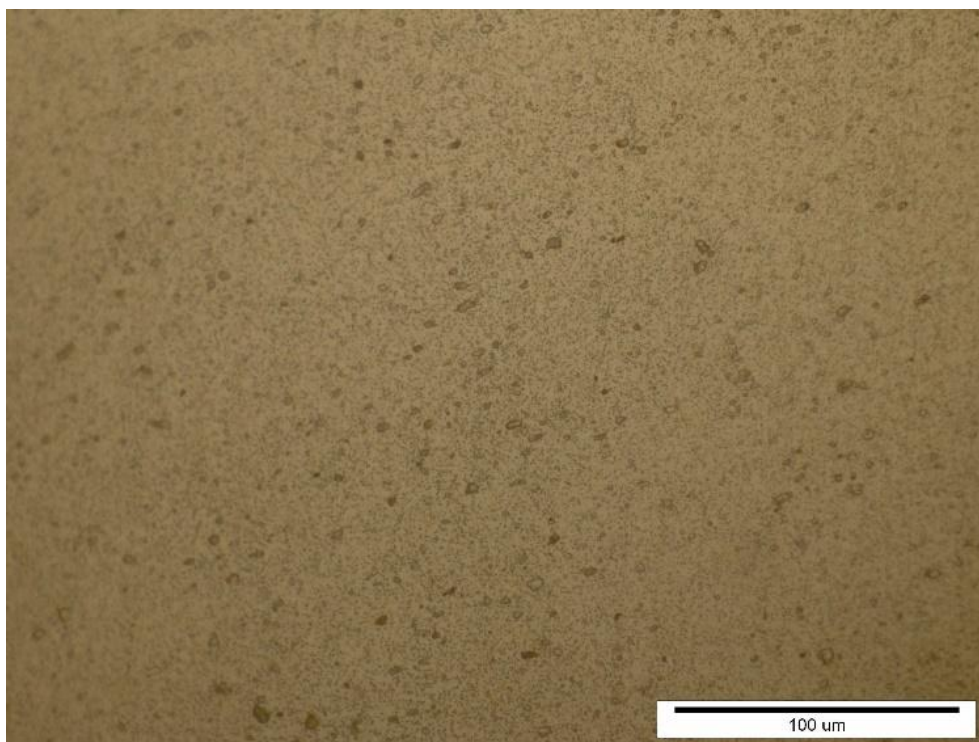


Slika 39. Mikrostruktura uzorka 1/ dozrijevano 1 h pri 130 °C

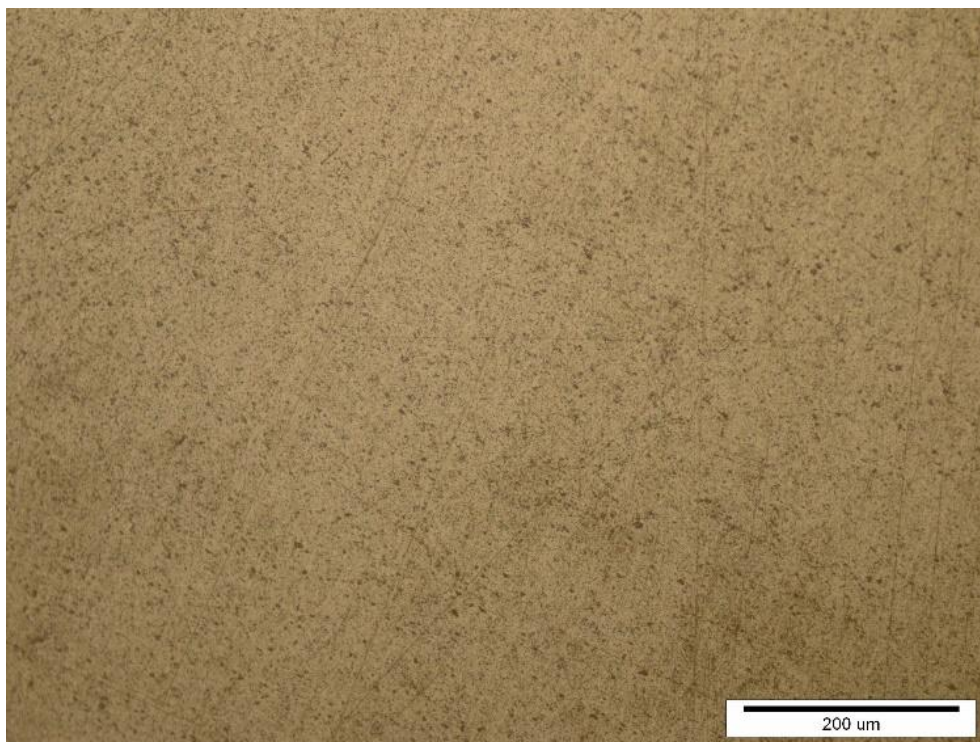




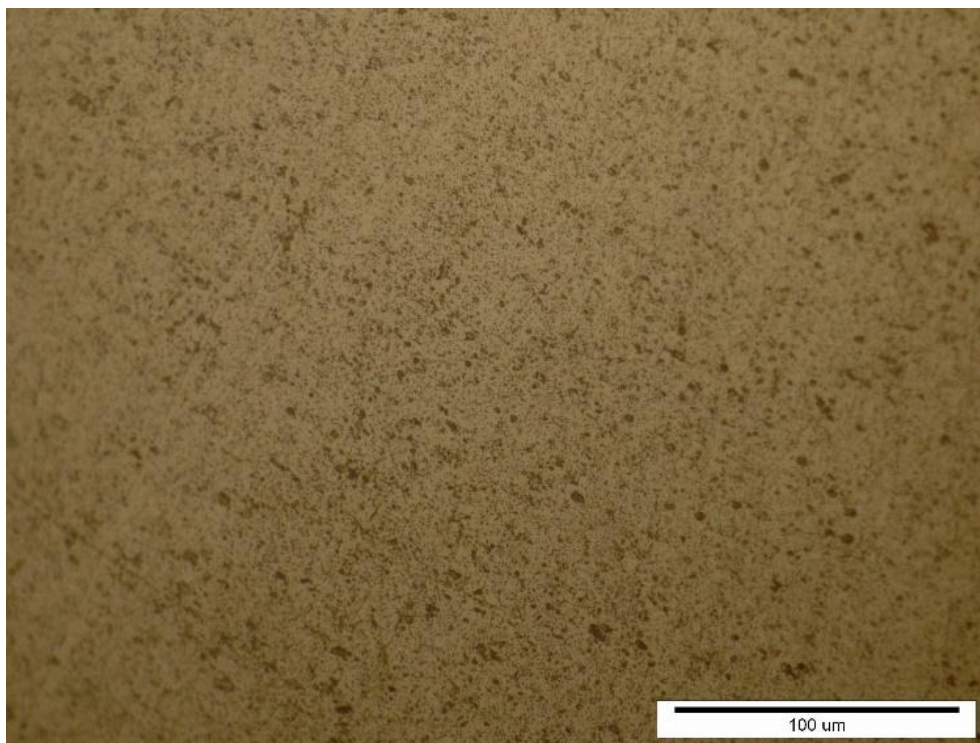
Slika 40. Mikrostruktura uzorka 4/ dozrijevano 4 h pri 130 °C



Slika 41. Mikrostruktura uzorka 4/ dozrijevano 4 h pri 130 °C

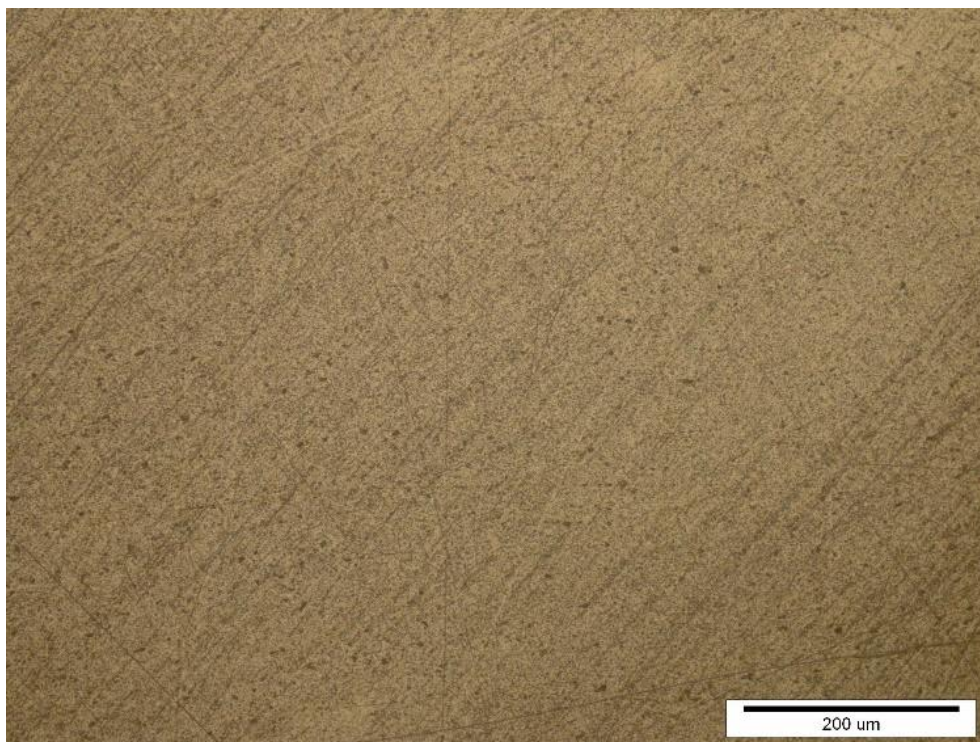


Slika 42. Mikrostruktura uzorka 7/ dozrijevano 10 h pri 130 °C

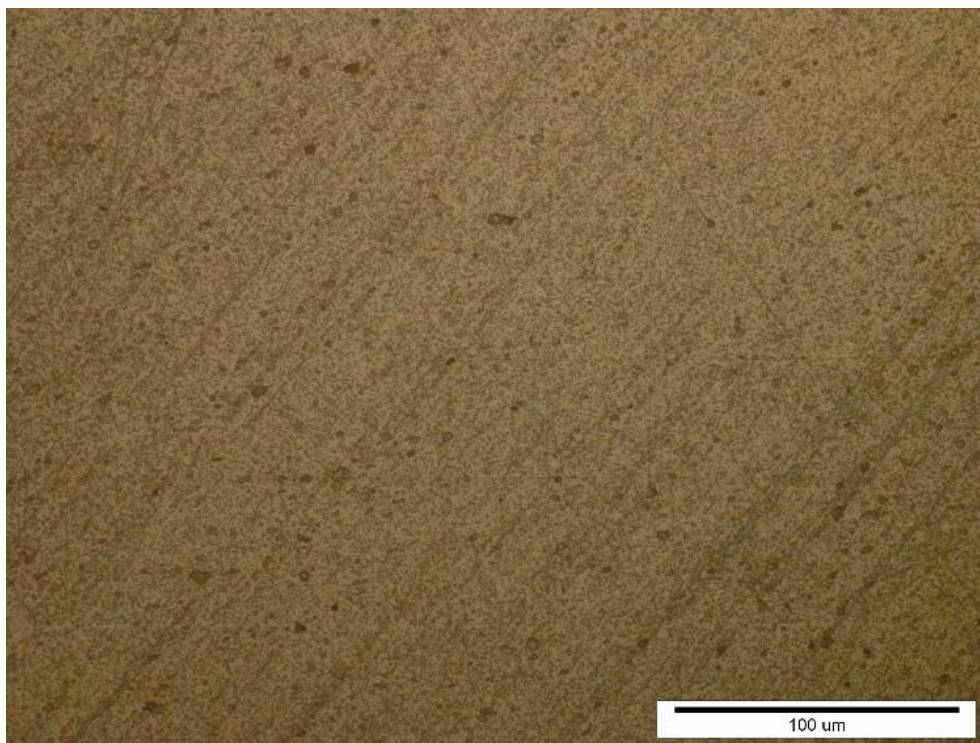


Slika 43. Mikrostruktura uzorka 7/ dozrijevano 10 h pri 130 °C

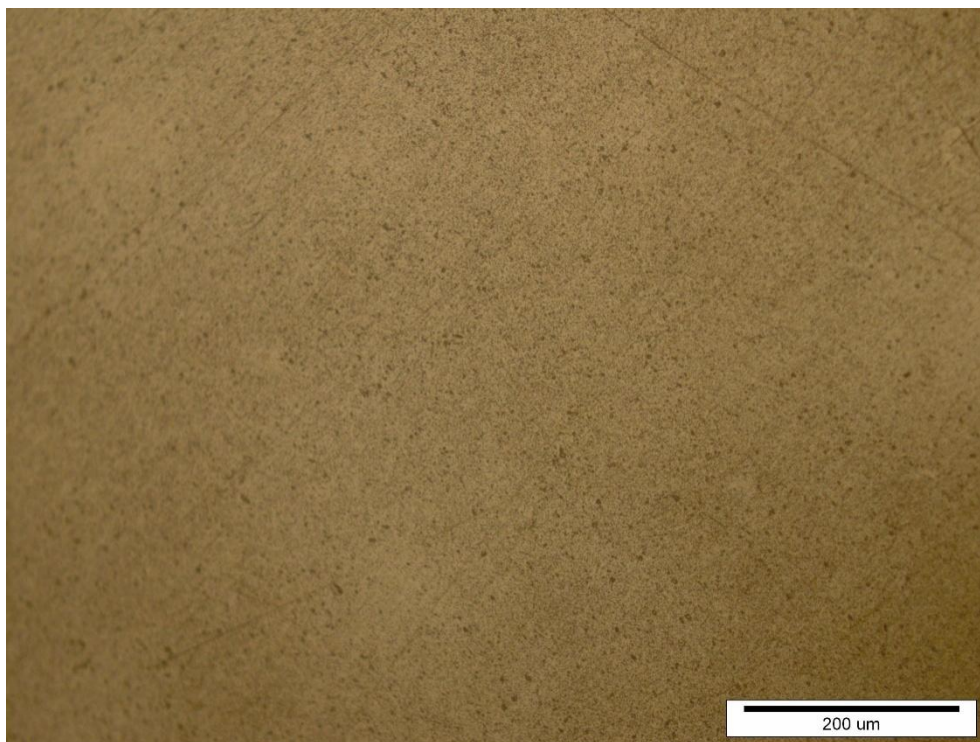




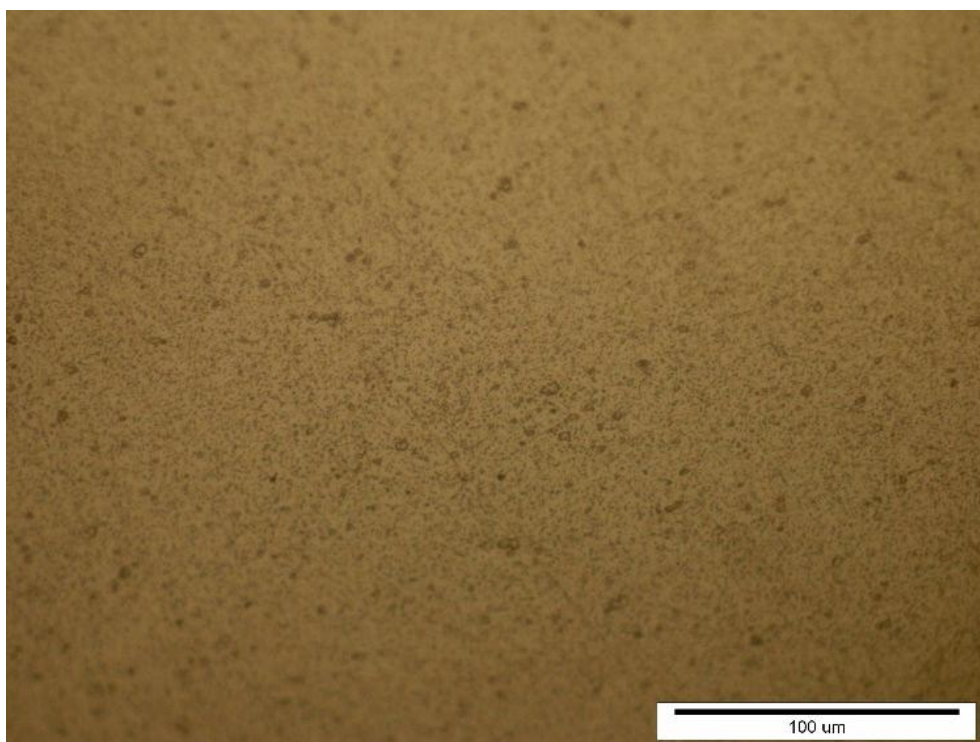
Slika 44. Mikrostruktura uzorka 10/ dozrijevano 1 h pri 160 °C



Slika 45. Mikrostruktura uzorka 10/ dozrijevano 1 h pri 160 °C

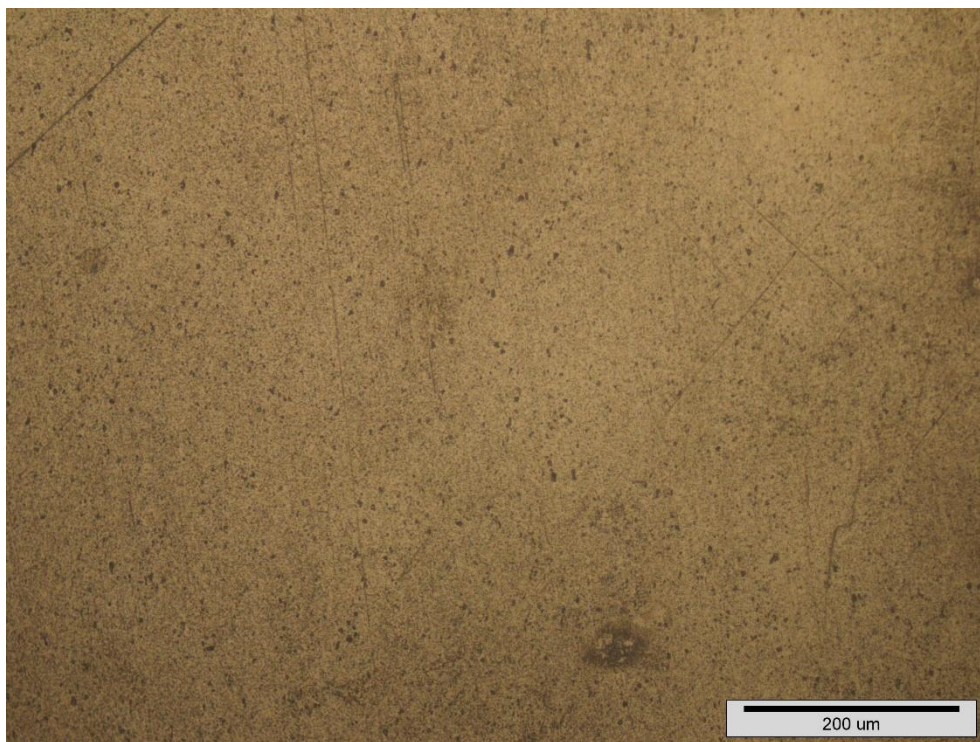


Slika 46. Mikrostruktura uzorka 13 / dozrijevano 4 h pri 160 °C

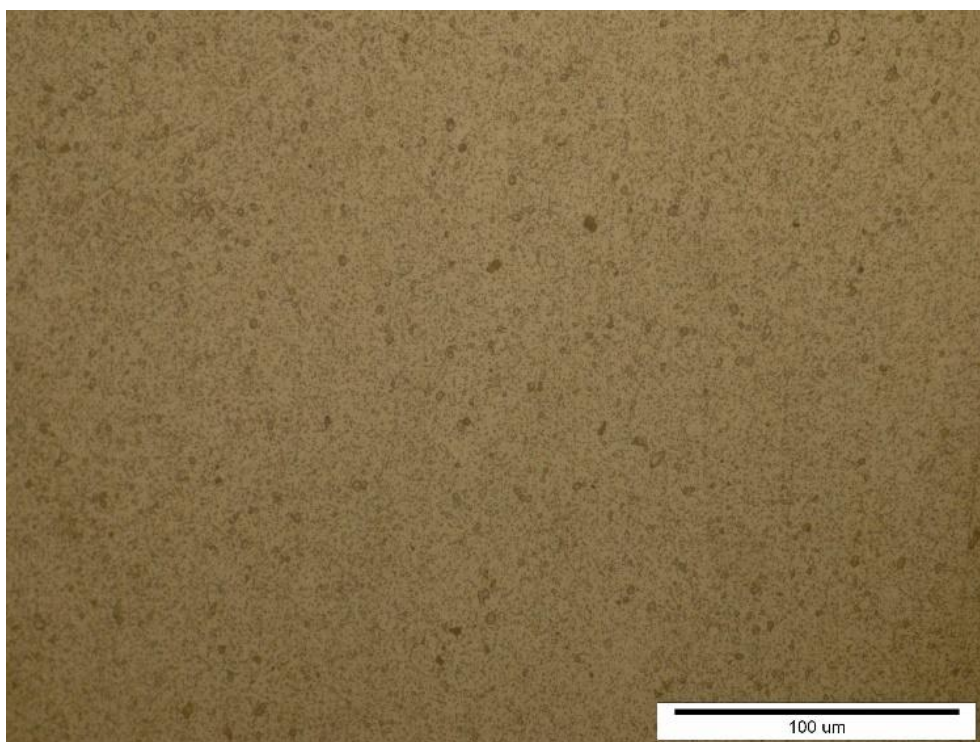


Slika 47. Mikrostruktura uzorka 13/ dozrijevano 4 h pri 160 °C

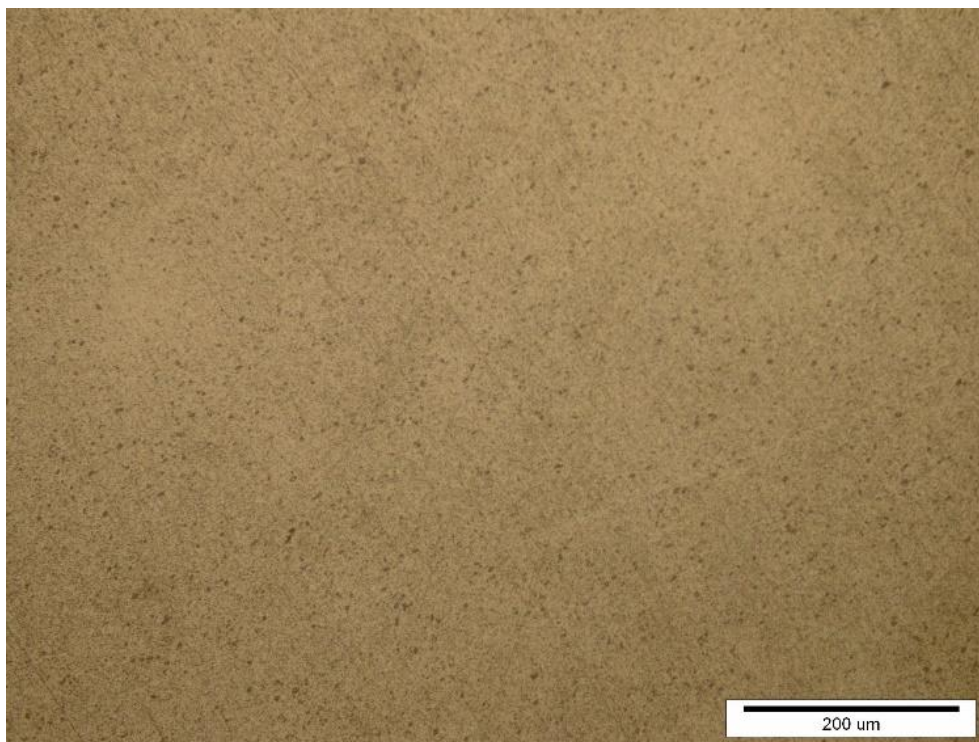




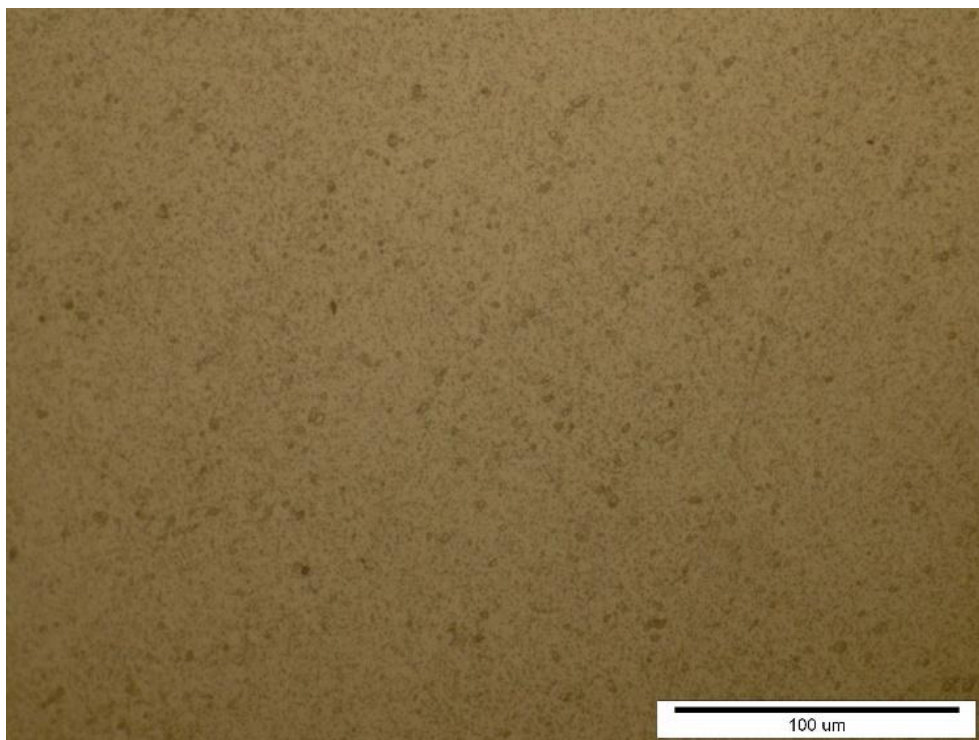
Slika 48. Mikrostruktura uzorka 16/ dozrijevano 10 h pri 160 °C



Slika 49. Mikrostruktura uzorka 16/ dozrijevano 10 h pri 160 °C



Slika 50. Mikrostruktura uzorka 19/ dozrijevano 1 h pri 190 °C

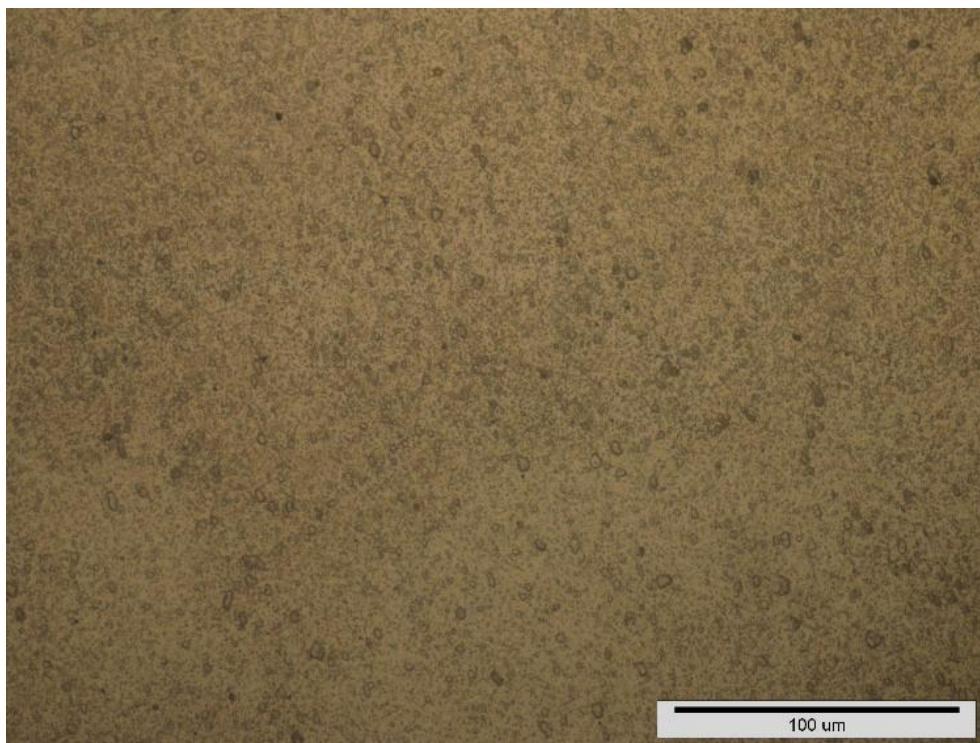


Slika 51. Mikrostruktura uzorka 19/ dozrijevano 1 h pri 190 °C





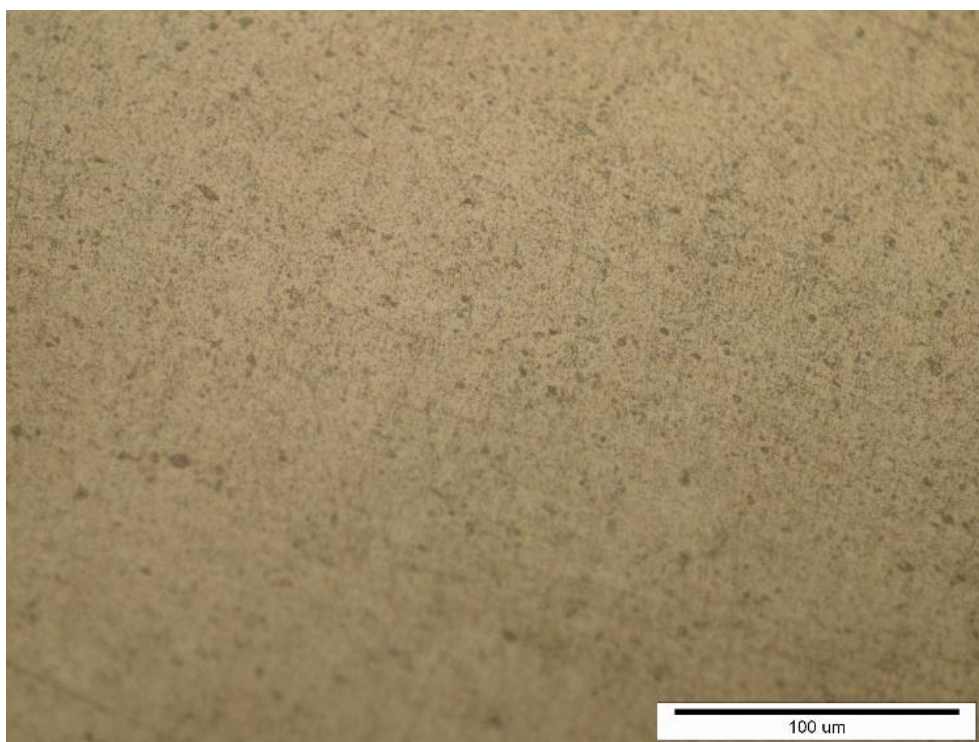
Slika 52. Mikrostruktura uzorka 22/ dozrijevano 4 h pri 190 °C



Slika 53. Mikrostruktura uzorka 22/ dozrijevano 4 h pri 190 °C



Slika 54. Mikrostruktura uzorka 25/ dozrijevano 10 h pri 190 °C



Slika 55. Mikrostruktura uzorka 25/ dozrijevano 10 h pri 190 °C



## 6.7. Ispitivanje udarnog rada loma

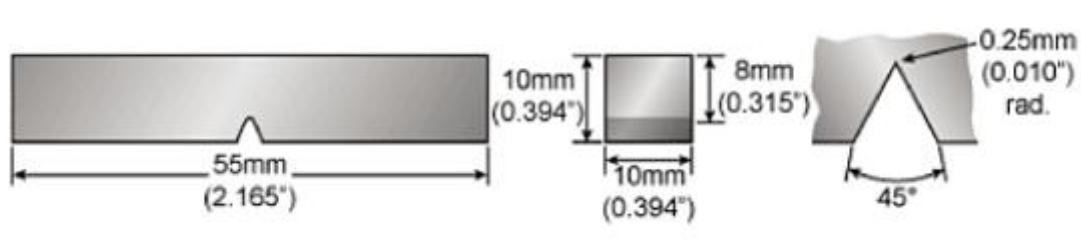
Ispitivanjem udarnog rada loma utvrđuje se ponašanje metalnih i polimernih materijala u uvjetima udarnog opterećenja. Ispitivanje se provodi na epruvetama s utorom te se na taj način postiže višeosno stanje naprezanja u korijenu utora. Vrijednost udarnog rada loma pokazuje hoće li se materijal ponašati žilavo ili krhko u uvjetima udarnog opterećenja.

Ispituju se epruvete četvrtastog poprečnog presjeka, s utorom u sredini, a opterećuje se na Charpyjevu batu, slika 56.



Slika 56. Charpyjev bat

Epruvete za ispitivanje su propisanih dimenzija 10·10·55 mm s “V” utorom dubine 2 mm smještenim pod kutom 45°, slika 57.

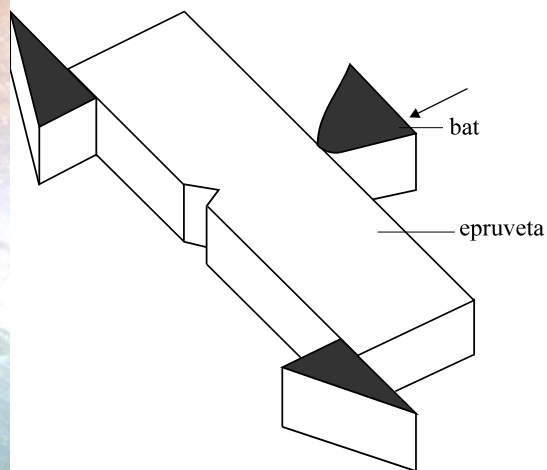


Slika 57. Dimenzije epruvete za Charpyjev test

Epruveta, oslonjena na dva oslonca (slika 58), savojno se opterećuje udarcem brida bata u sredini raspona nasuprot utoru. Uslijed udarca epruveta pukne u korijenu utora ili je oštrica bata provuče savinutu ali ne slomljenu između oslonaca.



Slika 58. Položaj epruvete u osloncima



Slika 59. Shematski prikaz načina udarnog opterećivanja epruvete na Charpyjevu batu

Energija potrebna da brid Charpyjeva bata prelomi epruvetu ili je provuče između oslonaca jednaka je udarnom radu loma. Izračunava se iz izraza:

$$KV(U) = G \cdot (h_1 - h_2), \text{ J,} \quad \text{gdje su}$$

$G$  težina bata, N,  $h_1$  početna visina bata, m, a  $h_2$  konačna visina, m, koju je bat dosegao nakon loma ili provlačenja epruvete. Iznos udarne radnje loma izražava se u  $J$  (N·m).

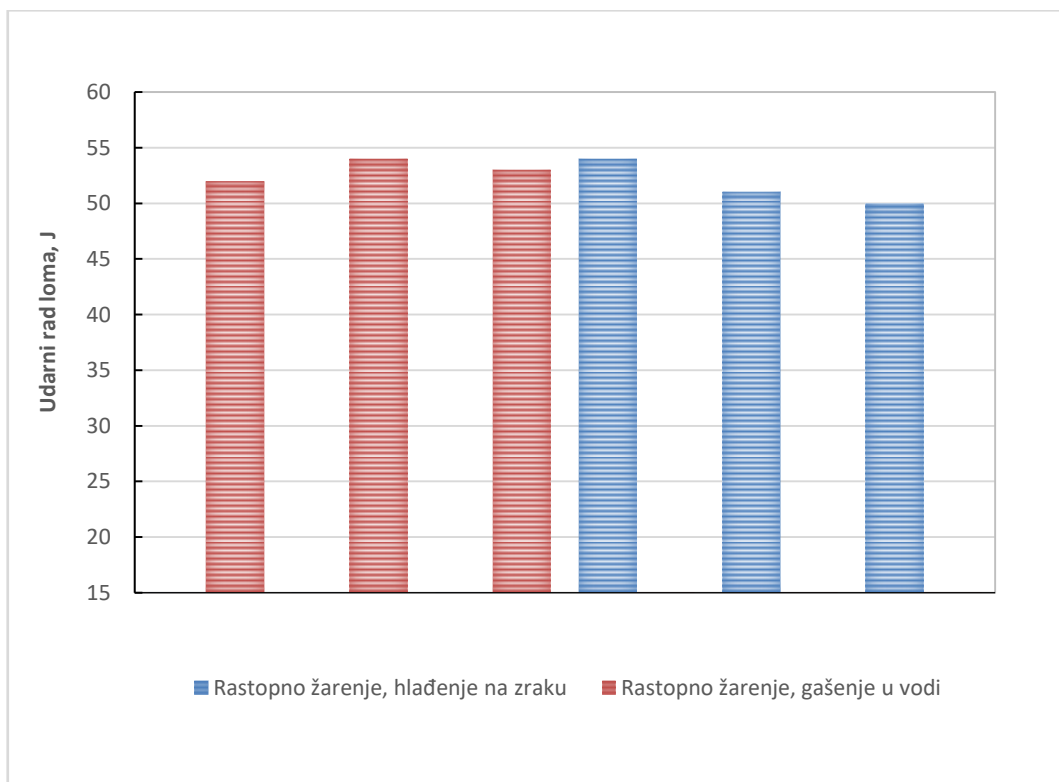
Ispitivanje udarnog rada lom provedeno je sukladno normi HRN EN ISO 148-1 u Laboratoriju za ispitivanje mehaničkih svojstava na Fakultetu strojarstva i brodogradnje. Ukupno su ispitane 33 epruvete koje su bile podvrgnute različitim temperaturno-vremenskim režimima toplinske obrade. Po tri epruvete ispitane su za svaki režim obrade. U tablici 6 navedene su srednje vrijednosti žilavosti i standardna devijacija za svako stanje toplinske obrade. U prilogu ovog rada u tablici T1 nalaze se pojedinačne vrijednosti žilavosti za svaku ispitivanu epruvetu.



Tablica 6. Srednje vrijednosti žilavosti i standardna devijacija za toplinski obrađene Al-uzorke

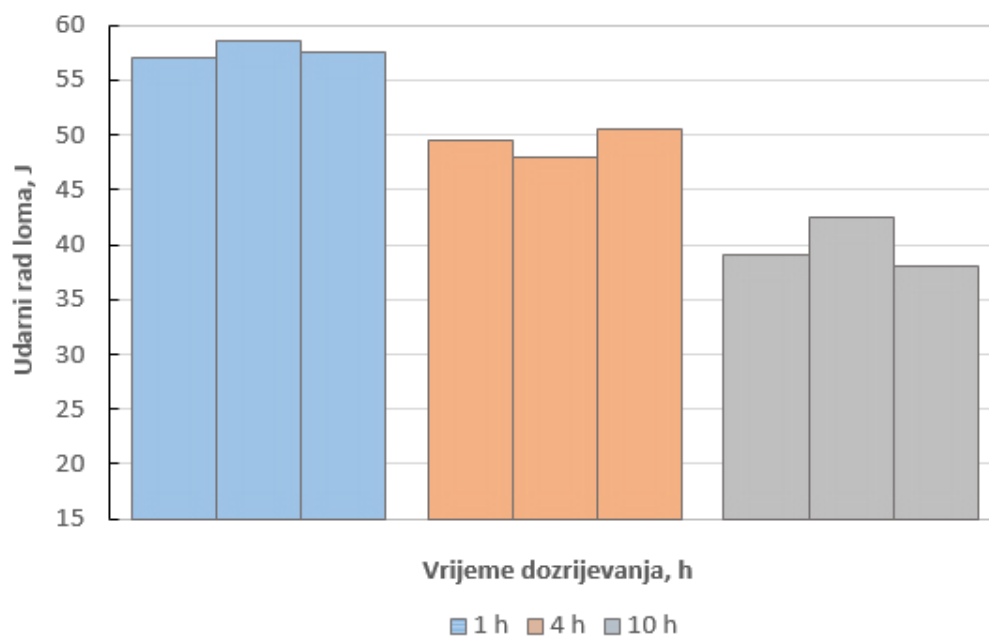
<b>Toplinska obrada</b>	<b>Srednja vrijednost žilavosti KV (J)</b>	<b>Standardna devijacija KV (J)</b>	<b>Toplinska obrada</b>	<b>Srednja vrijednost žilavosti KV (J)</b>	<b>Standardna devijacija KV (J)</b>
Rastvorno žareno i hlađeno na zraku	51,7	2,08	Rastvorno žareno i gašeno u vodi, dozrijevano 160°C/4h	21	1,73
Rastvorno žareno i gašeno u vodi	53	1	Rastvorno žareno i gašeno u vodi, dozrijevano 160°C/10h	19,2	1,61
Rastvorno žareno i gašeno u vodi, dozrijevano 130°C/1h	57,7	0,77	Rastvorno žareno i gašeno u vodi, dozrijevano 190°C/1h	36	1
Rastvorno žareno i gašeno u vodi, dozrijevano 130°C/4h	49,3	1,26	Rastvorno žareno i gašeno u vodi, dozrijevano 190°C/4h	26,8	1,61
Rastvorno žareno i gašeno u vodi, dozrijevano 130°C/10h	39,8	2,36	Rastvorno žareno i gašeno u vodi, dozrijevano 190°C/10h	44,5	3,12
Rastvorno žareno i gašeno u vodi, dozrijevano 160°C/1h	39,3	2,51	-	-	-

Na slikama 60-66 grafički su prikazane pojedinačne vrijednosti udarnog rada loma izmjerene na toplinski obrađenim uzorcima. Slika 66 prikazuje rezultate žilavosti nedozrijevanih uzoraka koji su nakon rastopnog žarenja hlađeni na zraku odnosno gašeni u vodi. Vidljivo je da su vrijednosti udarnog rada loma podjednake premda je bilo za očekivati veće razlike uvjetovane različitim brzinama hlađenja.

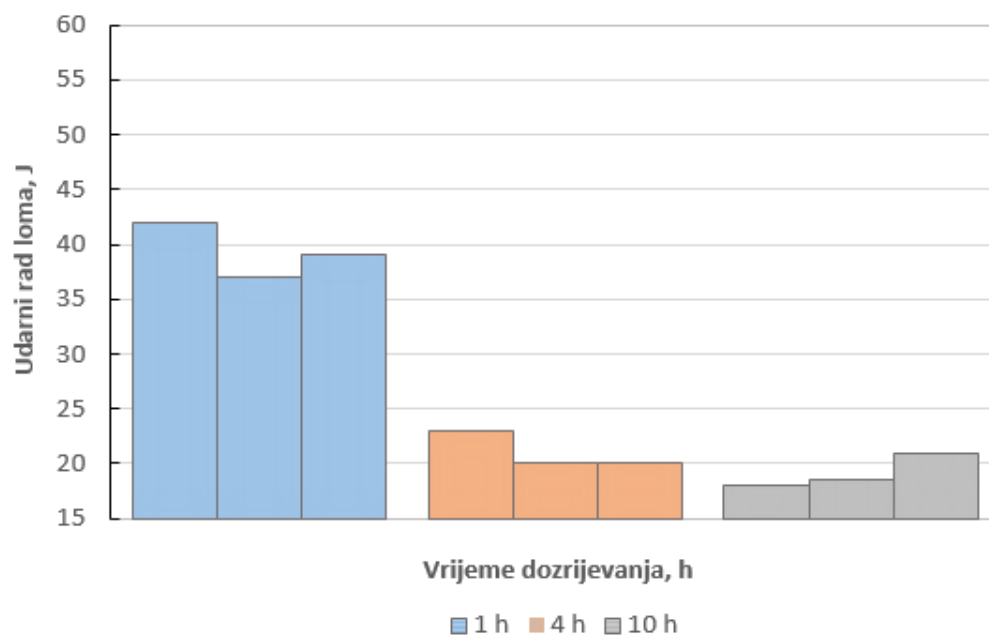


Slika 60. Izmjerene vrijednosti udarnog rada loma za nedozrijevane uzorke

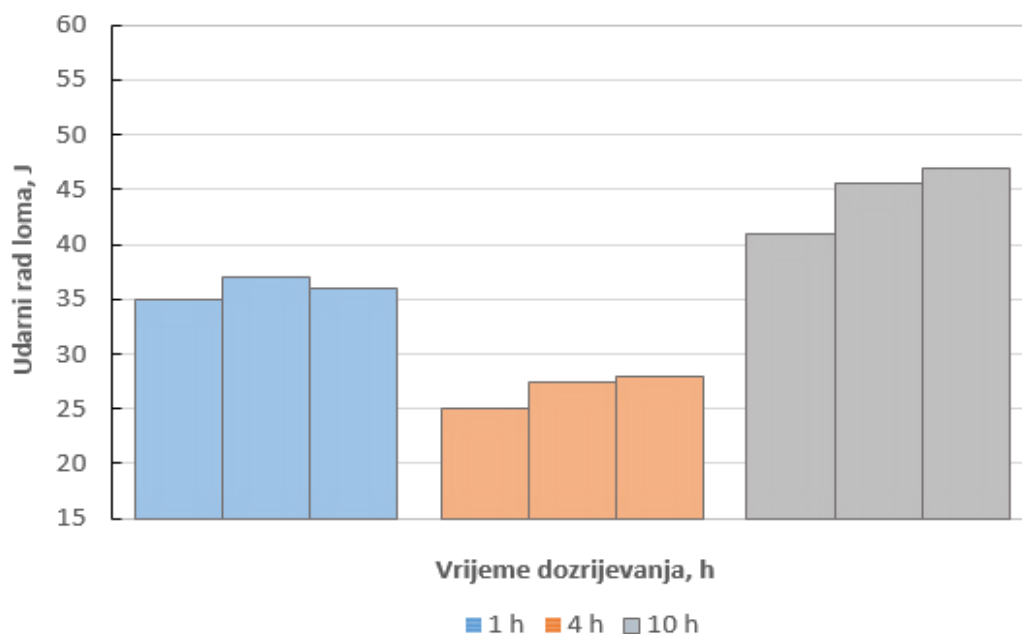
Na slikama 61 do 63 prikazane su vrijednosti žilavosti epruveta koje su nakon rastopnog žarenja podvrgnute dozrijevanju u području temperatura 130 do 190 °C u vremenskom trajanju 1 do 10 h. Za temperature 130 °C i 160 °C vidljivo je da vrijednosti žilavosti opadaju duljim trajanjem dozrijevanja zbog mogućeg očvrnuća epruveta dok je kod temperature 190 °C najveća žilavost zabilježena upravo pri najduljem dozrijevanju. Usporede li se vrijednosti žilavosti za uzorke dozrijevane pri 130 i 160 °C očito je da niže temperature dozrijevanja vode većoj žilavosti za sva tri vremenska stanja 1, 4 i 10 h.



Slika 61. Izmjerene vrijednosti udarnog rada loma / dozrijevano pri 130 °C

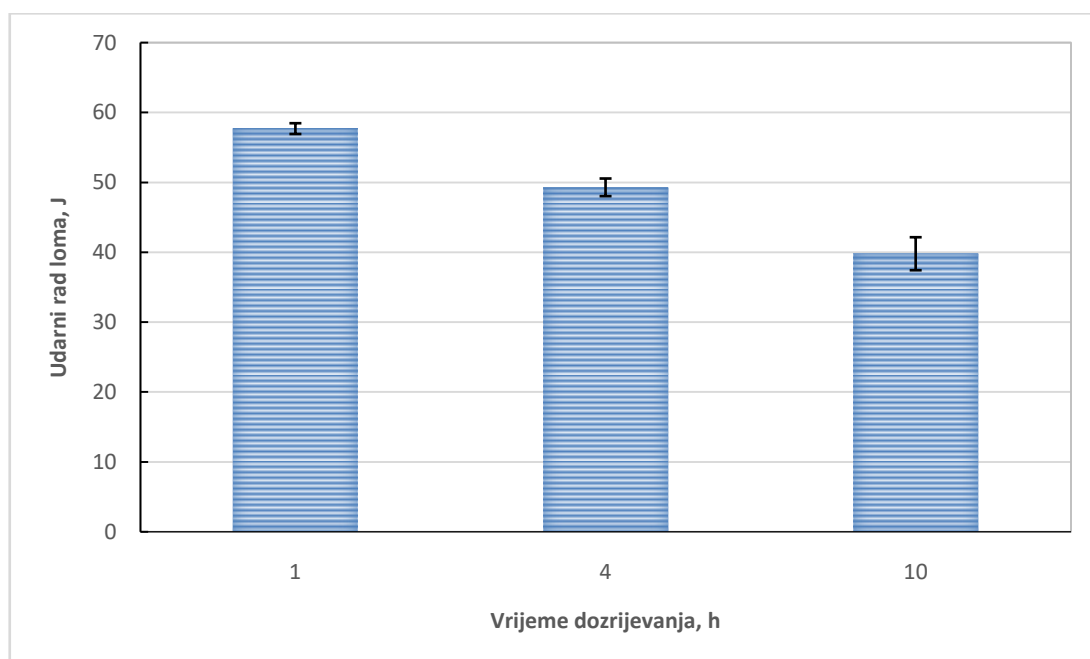


Slika 62. Izmjerene vrijednosti udarnog rada loma / dozrijevano pri 160 °C

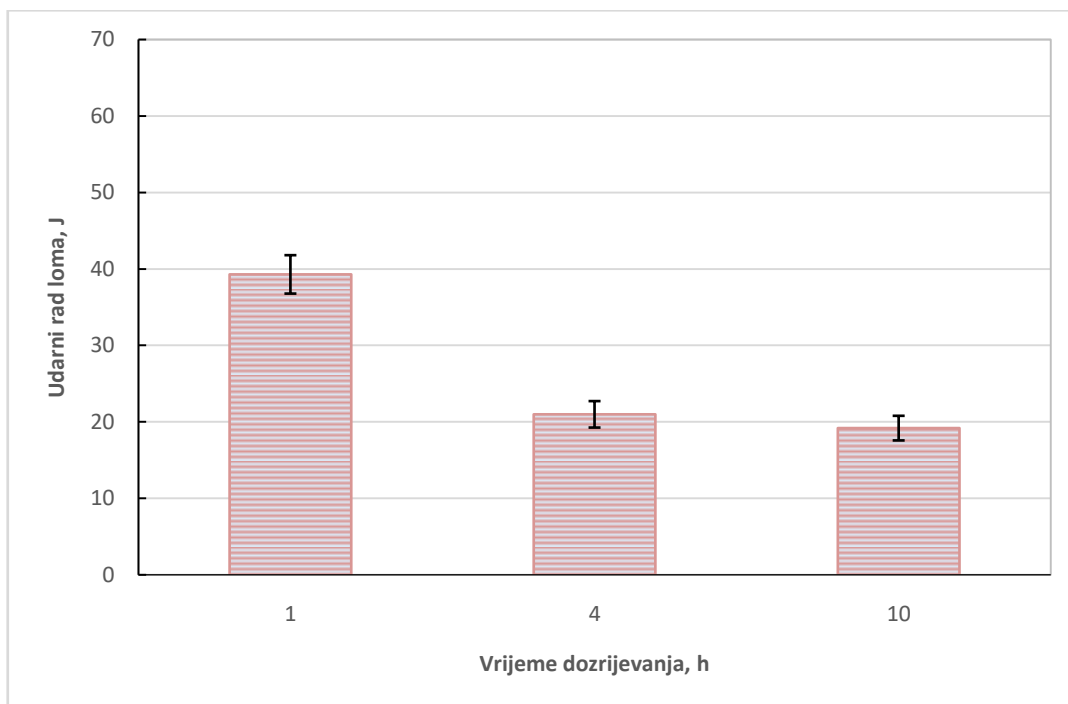


Slika 63. Izmjerene vrijednosti udarnog rada loma / dozrijevano pri 190 °C

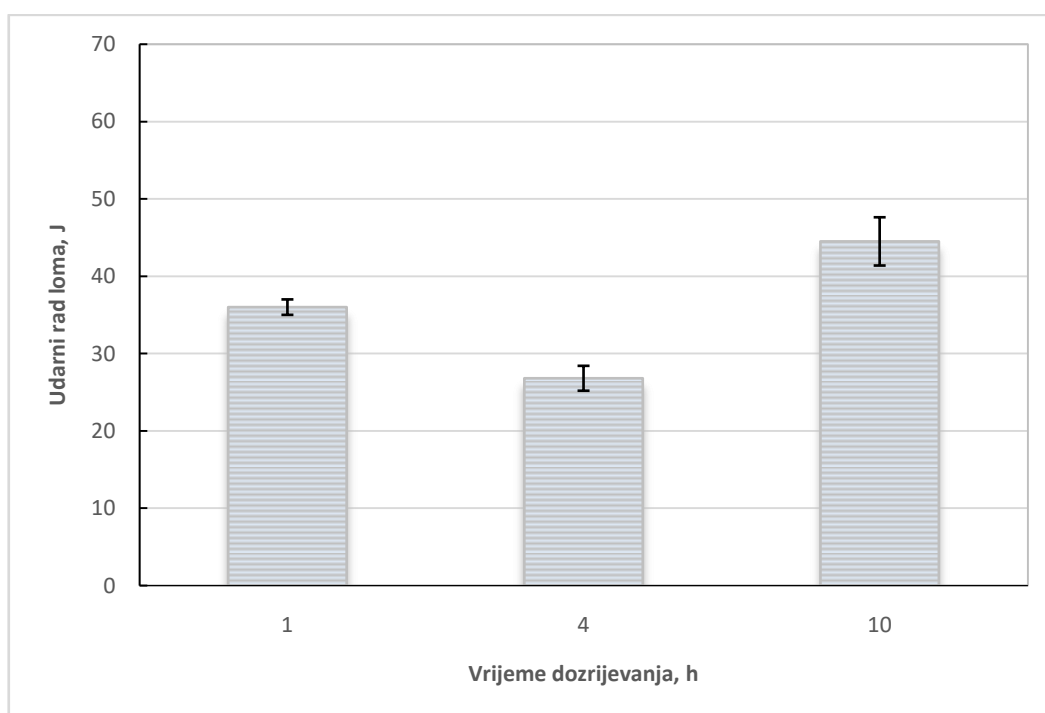
Srednje vrijednosti udarnog rada loma za uzorake dozrijeване pri 130, 160 i 190 °C u vremenskom trajanju 1, 4 i 10 h redom ilustriraju grafički prikazi na slikama 64 do 66.



Slika 64. Srednje vrijednosti udarnog rada loma / dozrijevano pri 130 °C

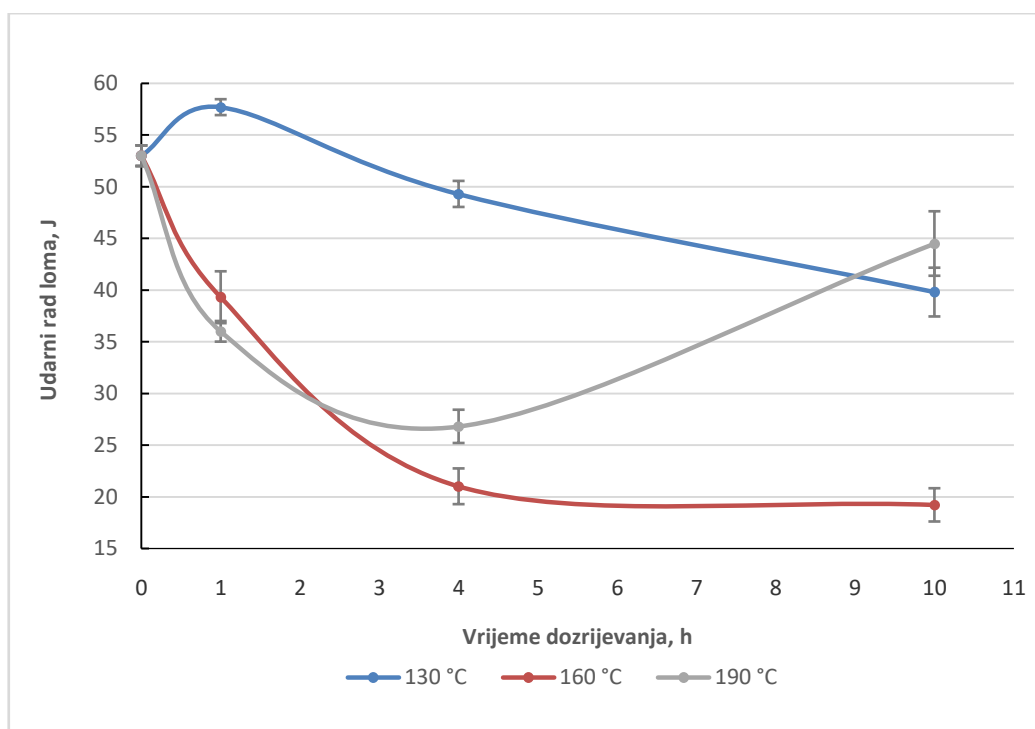


Slika 65. Srednje vrijednosti udarnog rada loma / dozrijevano pri 160 °C



Slika 66. Srednje vrijednosti udarnog rada loma / dozrijevano pri 190 °C

Ovisnost udarnog rada loma o temperaturi i vremenu dozrijevanja prikazuje dijagram na slici 67. Najveći pad žilavosti zabilježen je kod uzoraka dozrijevanih pri 160 °C, a nešto manji za uzorke dozrijeване pri 130 °C gdje čak dolazi do blagog porasta žilavosti pri najkraćem dozrijevanju od 1 h. Kada je riječ o temperaturi dozrijevanja 190 °C također se može uočiti velik pad žilavosti s porastom tajanja dozrijevanja sve do 4 h nakon čega daljnjim dozrijevanjem vrijednosti udarnog rada loma intenzivno rastu.



Slika 67. Ovisnost udarnog rada loma o temperaturi i vremenu dozrijevanja

## 6.8. Ispitivanje tvrdoće

Mjerenje tvrdoće toplinski obrađenih uzoraka provedeno je u Laboratoriju za mehanička ispitivanja Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zavodu za materijale. Izmjerene su tvrdoće na ukupno 11 uzoraka pri čemu svaki uzorak prezentira jedno toplinsko stanje. Mjerenje je provedeno po metodi Vickers na referentnom tvrdomjeru „Indentec“, slika 68, čije su karakteristike prikazane u tablici 7.

Tablica 7. Karakteristike tvrdomjera „Indentec“

<b>Proizvođač</b>	Indentec hardness testing machines limited
<b>Opterećenja</b>	HV1; HV3; HV5; HV10; HV20; HV30; HV50
<b>Metoda mjerenja</b>	Digitalna, Vickers
<b>Mjerna nesigurnost</b>	$\pm 1\text{HV}$
<b>Rezolucija</b>	0,1 $\mu\text{m}$



Slika 68. Referentni tvrdomjer „Indentec“

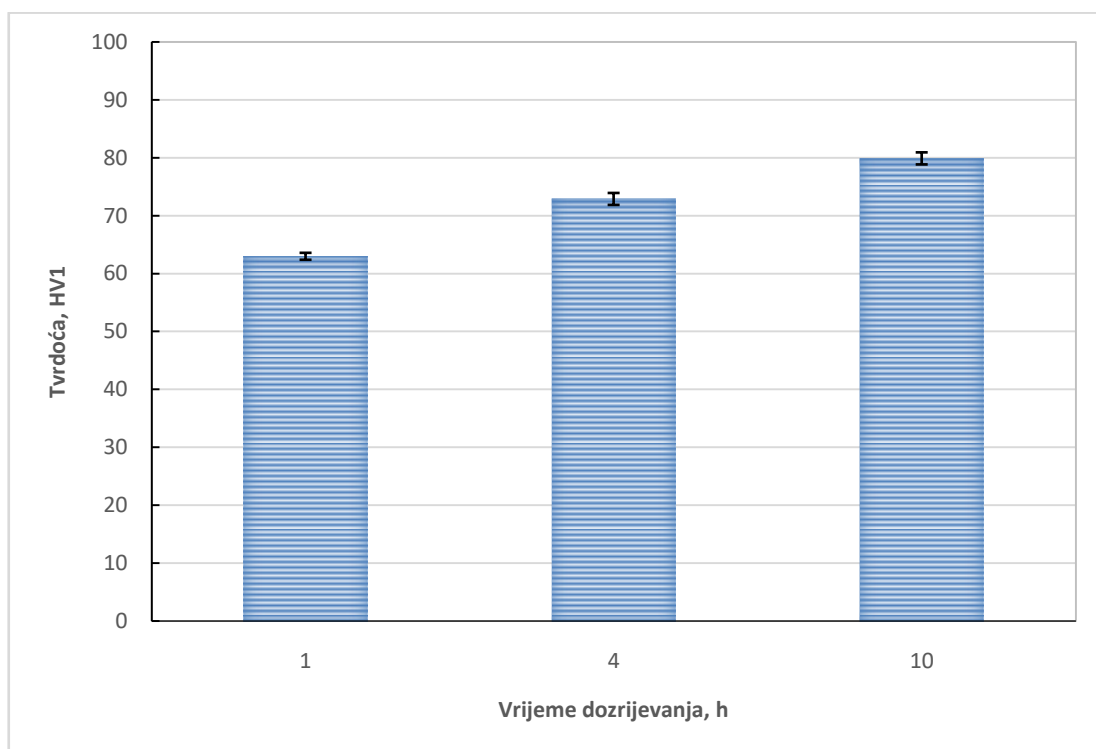
Za ispitivanje tvrdoće metodom HV1 korišteno je opterećenje od 1·9,81 N. Na svakom uzorku napravljeno je 5 mjerenja čiji su rezultati navedeni u tablicama T2, T3, T4 i T5 u prilogu ovog rada. Tablica 8 sadrži srednje vrijednosti izmjerenih tvrdoća i standardno odstupanje za svaki ispitivani uzorak.

Tablica 8. Srednje vrijednosti tvrdoće i standardna devijacija za toplinski obrađene Al-uzorke

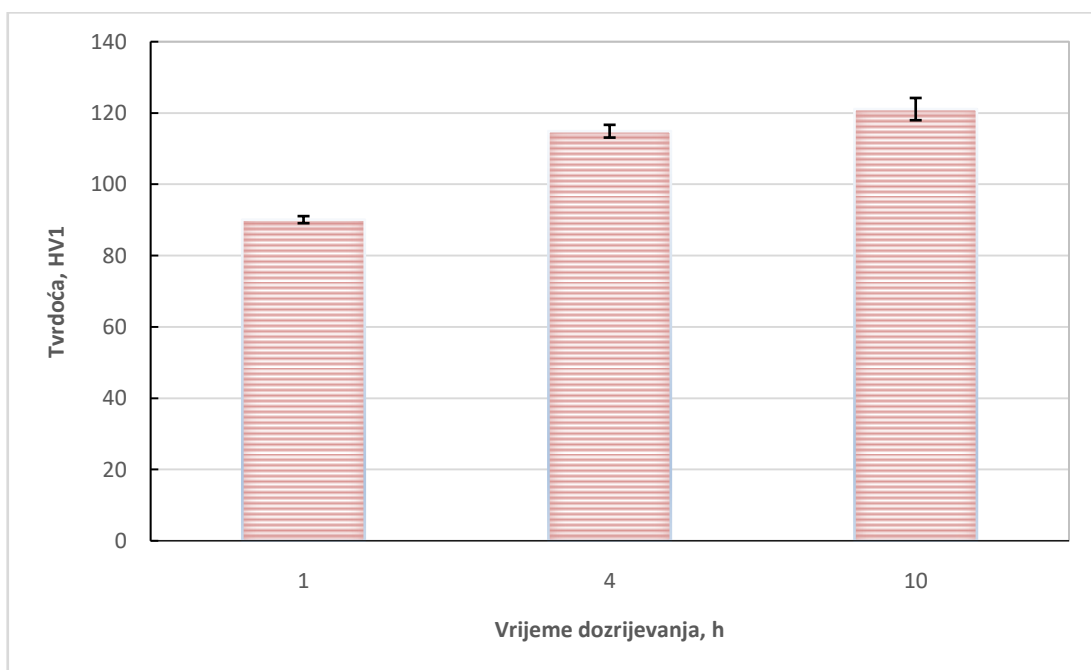
Uzorak	Toplinska obrada	Srednja vrijednost tvrdoće HV1	Stand. dev. HV1	Uzorak	Toplinska obrada	Srednja vrijednost tvrdoće HV1	Stand. dev. HV1
0	Polazno stanje	87,4	2,15	10	Rastvorno žareno i gašeno u vodi, dozrijevano 160°C/1h	90,1	0,99
33	Rastvorno žareno i hlađeno na zraku	52,4	0,85	13	Rastvorno žareno i gašeno u vodi, dozrijevano 160°C/4h	114,9	1,79
30	Rastvorno žareno i gašeno u vodi	62	0,9	16	Rastvorno žareno i gašeno u vodi, dozrijevano 160°C/10h	121,1	3,12
1	Rastvorno žareno i gašeno u vodi, dozrijevano 130°C/1h	63	0,6	19	Rastvorno žareno i gašeno u vodi, dozrijevano 190°C/1h	102	1,44
4	Rastvorno žareno i gašeno u vodi, dozrijevano 130°C/4h	72,9	1,03	22	Rastvorno žareno i gašeno u vodi, dozrijevano 190°C/4h	113	1,71
7	Rastvorno žareno i gašeno u vodi, dozrijevano 130°C/10h	79,9	1,04	25	Rastvorno žareno i gašeno u vodi, dozrijevano 190°C/10h	85,8	1,52



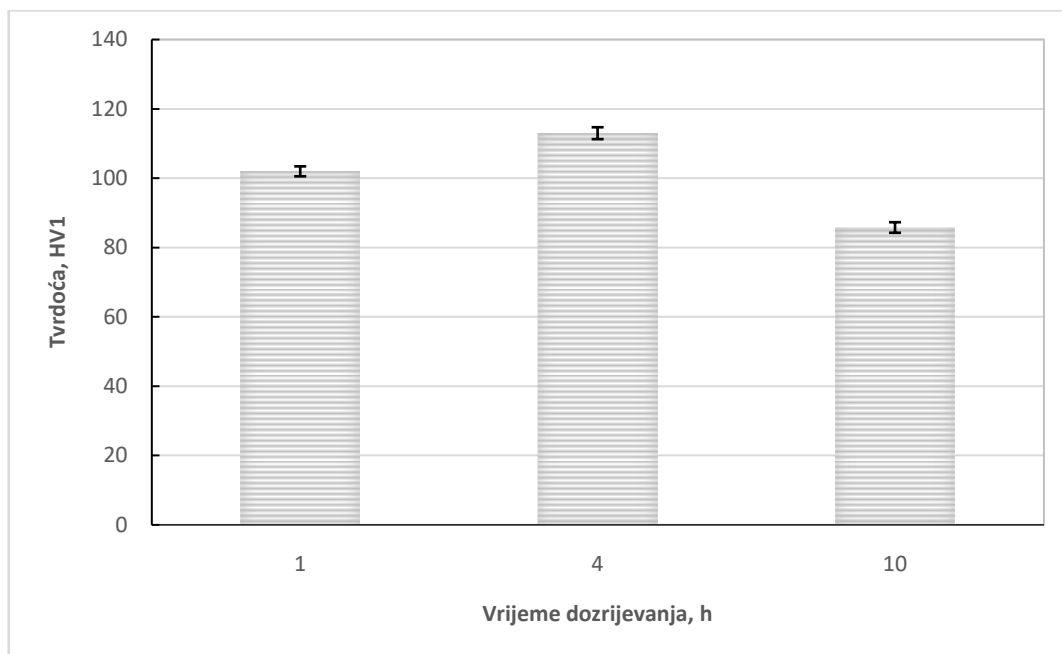
Na slikama 69 do 71 grafički su prikazane srednje vrijednosti tvrdoća za različite vremenske režime dozrijevanja pri temperaturama 130, 160 i 190 °C.



Slika 69. Srednje vrijednosti tvrdoće / dozrijevano pri 130 °C

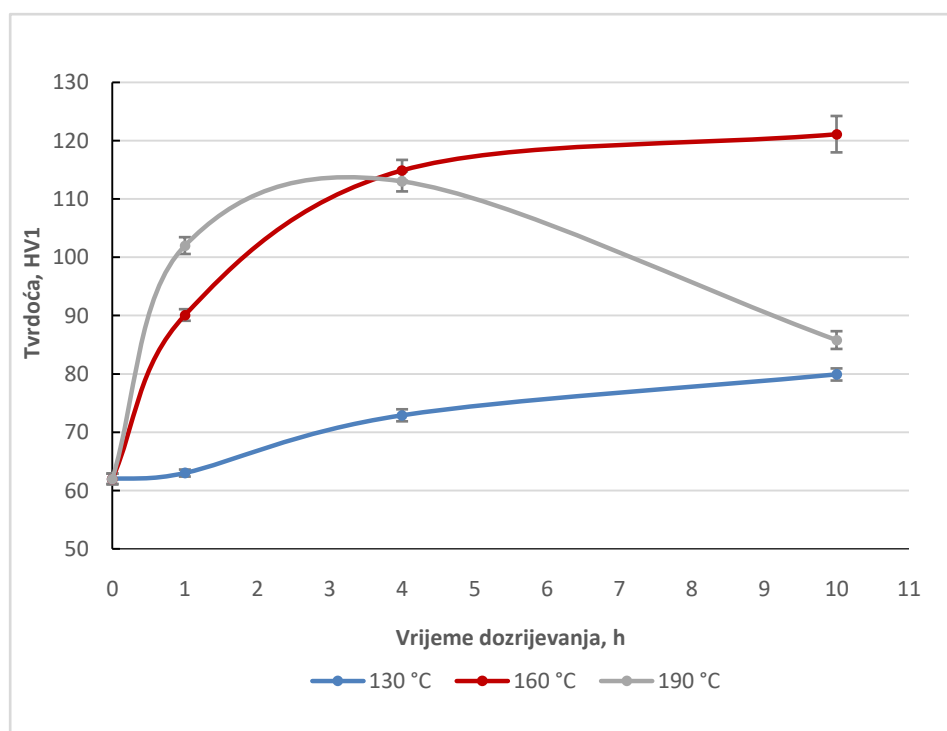


Slika 70. Srednje vrijednosti tvrdoće / dozrijevano pri 160 °C



Slika 71. Srednje vrijednosti tvrdoće / dozrijevano pri 190 °C

Slika 72 ilustrira variranje tvrdoće s obzirom na vrijeme dozrijevanja za sve tri ispitivane temperature.

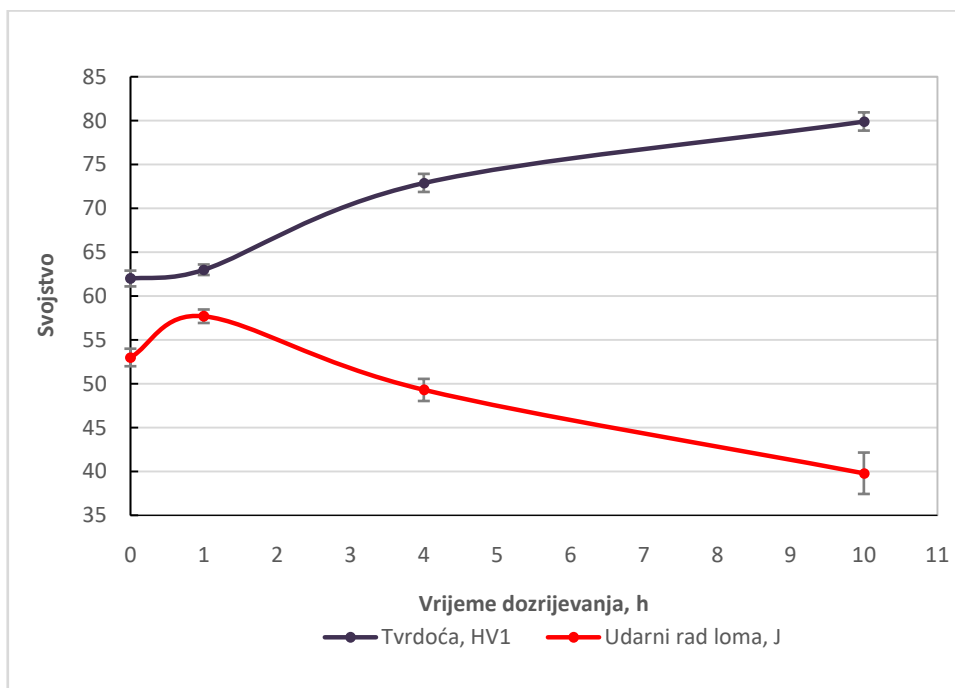


Slika 72. Ovisnost tvrdoće o temperaturi i vremenu dozrijevanja

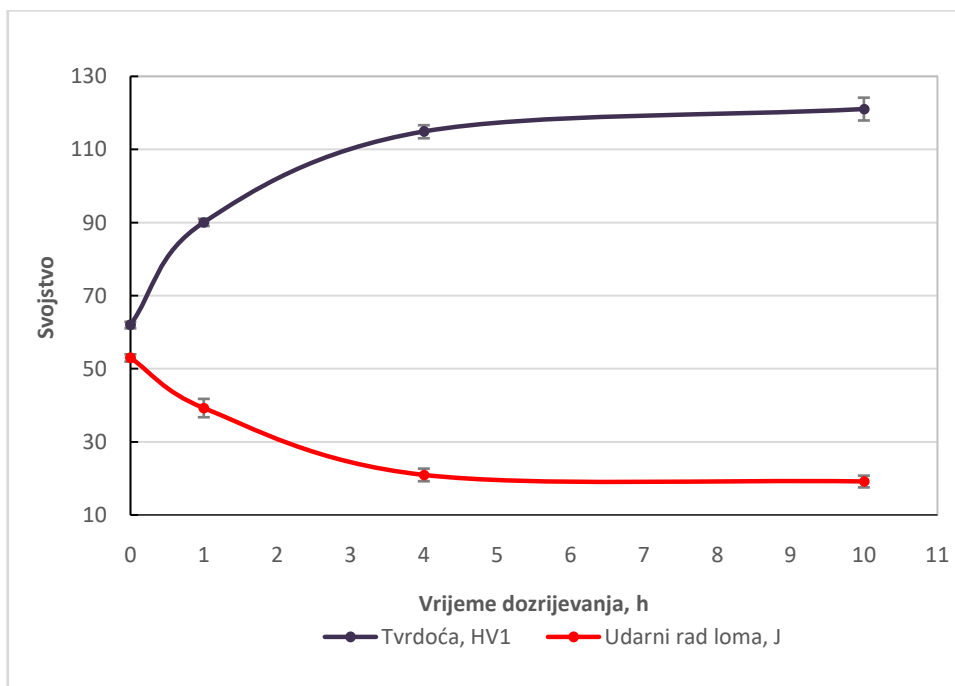
Kod dozrijevanja pri 130 °C blagi porast tvrdoće opaža se duljim držanjem uzoraka na ovoj temperaturi. Zagrijavanje na 160 °C uzrokuje veći porast tvrdoće nego što je to pri temperaturi 130 °C, a nakon 10 sati držanja pri 160 °C dobiva se najviša tvrdoća za sva toplinski ispitivana stanja. Kod dozrijevanja pri temperaturi 190 °C najviša tvrdoća postignuta je nakon 4 sata, a dulje držanje na ovoj temperaturi uzrokuje pad tvrdoće zbog moguće pojave predozrijevanja.

## 6.9. Usporedba tvrdoće i udarnog rada loma

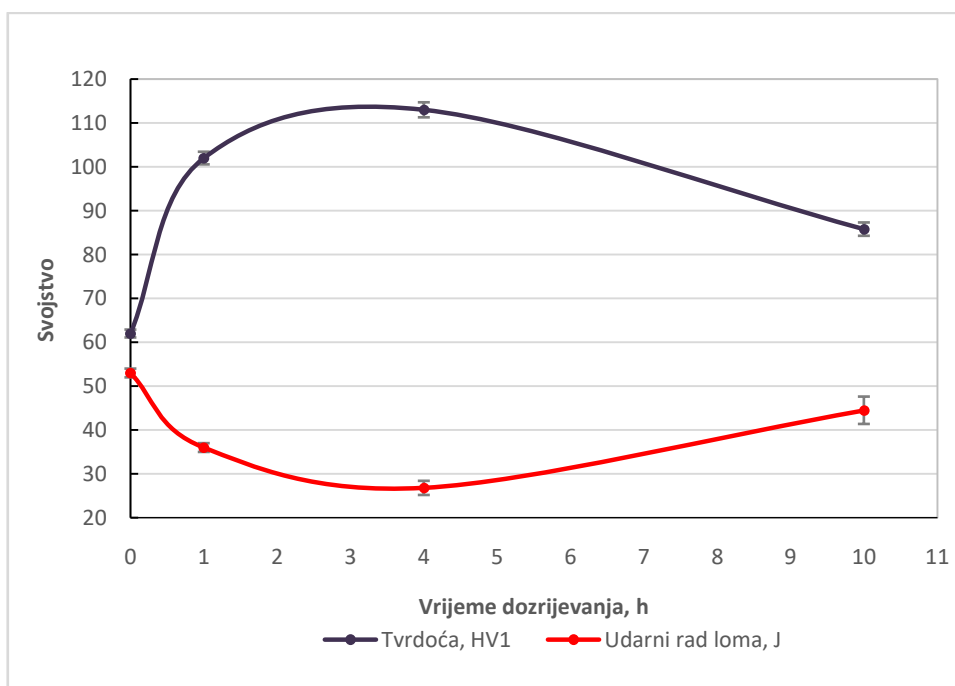
Na slikama 73 do 75 usporedno su prikazana svojstva udarnog rada loma i tvrdoće za sva tri režima dozrijevanja pri 130 °C, 160 °C i 190 °C.



Slika 73. Usporedba tvrdoće i udarnog rada loma / dozrijevano pri 130 °C



Slika 74. Usporedba tvrdoće i udarnog rada loma / dozrijevano pri 160 °C

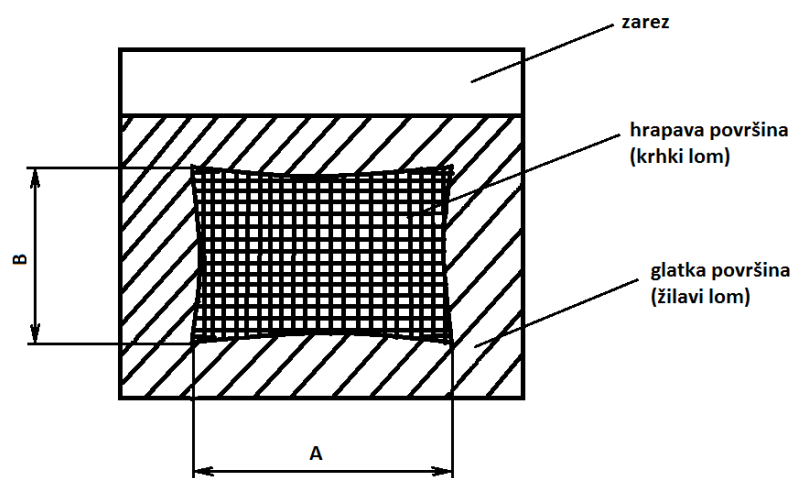


Slika 75. Usporedba tvrdoće i udarnog rada loma / dozrijevano pri 190 °C

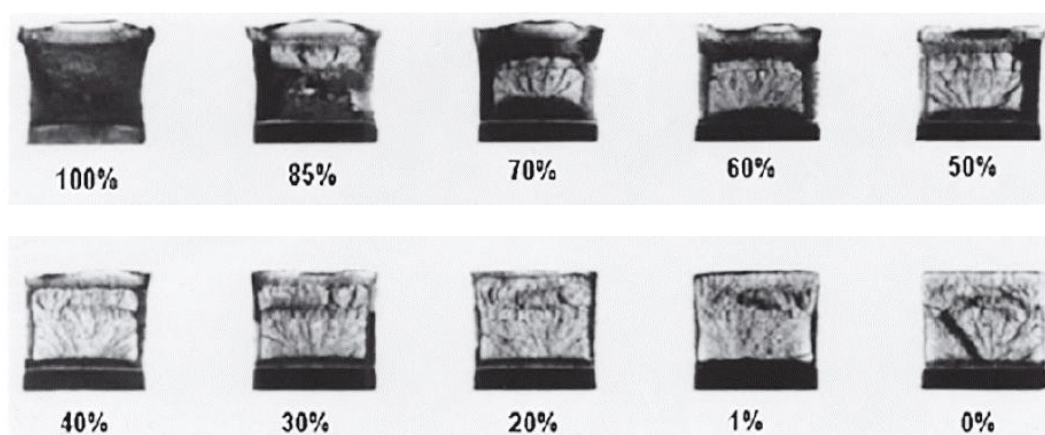
Iz gornjih dijagrama proizlazi da postupkom dozrijevanja dolazi do očvršnuća ispitivane Al-legure, a time i porasta tvrdoće. Istovremeno, kako su čvrstoća i žilavost obrnuto proporcionalna svojstva vrijednosti udarnog rada loma padaju tako da krivulje izgledaju kao odraz u ogledalu.

## 6.10. Analiza prijelomne površine

Prijelomna površina na epruveti nakon Charpyevog testa se ocjenjuje po udjelu površine žilavog loma. Što je veći postotak glatke površine koja ukazuje na žilavi lom, veća je i žilavost materijala. Prijelomne površine većine uzoraka ispitanih Charpyevim testom kombinacija su glatkih i hrapavih površina. Postupak određivanja žilavog loma sastoji se od mjerenja duljine i širine hrapave površine loma (slika 76) što je provedeno u ovom radu, ali isto tako se može odrediti i vizulnom usporedbom prijelomnih površina s onim na slici 77 ili pak mjerenjem duljine i širine površine krhkog loma nekim od računalnih programa za analizu slike.



Slika 76. Skica prijelomne površine epruvete



Slika 77. Predložak lomova za vizualnu usporedbu s postotnim udjelom žilavog loma

U tablici 9 navedene su duljina (A) i širina (B) površine krhkog loma za svaku od 11 ispitivanih epruveta, a time i za svako toplinsko stanje temeljem kojih su određeni udjeli krhkog i žilavog loma uz pomoć vrijednosti navedenih u tablici 10.

Tablica 9. Udjeli žilavog i krhkog loma za toplinski obrađene Al-uzorke

Uzorak	Temperatura dozrijevanja  °C	Vrijeme držanja  h	Karakteristike loma				
			A mm	B mm	P <sub>krhki</sub> mm <sup>2</sup>	Udjel krhkog loma %	Udjel duktil. loma %
1	130	1	4,8	4,7	22,6	28,1	71,9
4		4	4,8	4,7	22,6	28,1	71,9
7		10	5,5	5	27,5	34	66
10	160	1	6	5,4	32,4	39,1	60,9
13		4	7	6,2	43,4	54,2	45,8
16		10	10	8	80	100	0
19	190	1	5,7	6	34,2	64,9	35,1
22		4	6	5,7	34,2	64,9	35,1
25		10	4,6	4,7	21,6	26,8	73,2
30	- <sup>1)</sup>	-	4,8	4,6	22,1	27,5	72,5
33	- <sup>2)</sup>	-	4,9	4,8	23,5	29,2	70,8

Napomena:

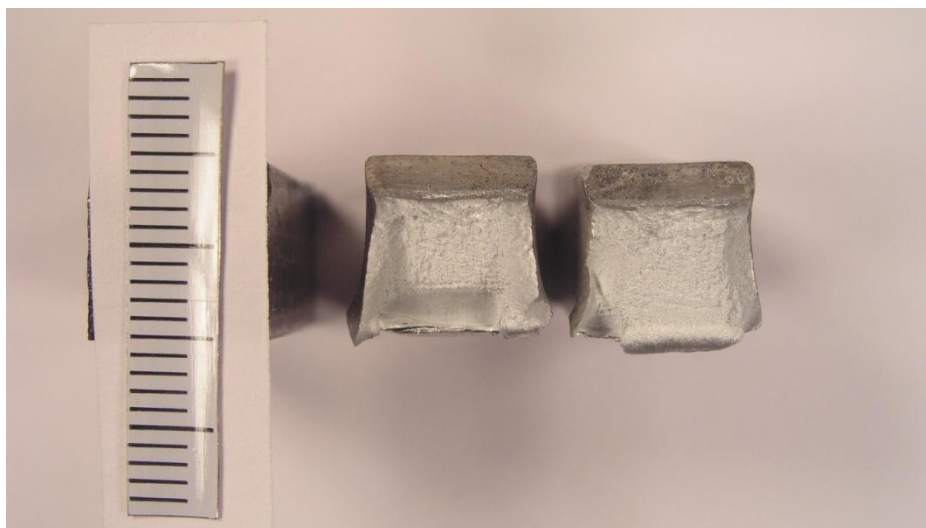
<sup>1)</sup> Rastvorno žareno i gašeno u vodi

<sup>2)</sup> Rastvorno žareno i hlađeno na zraku

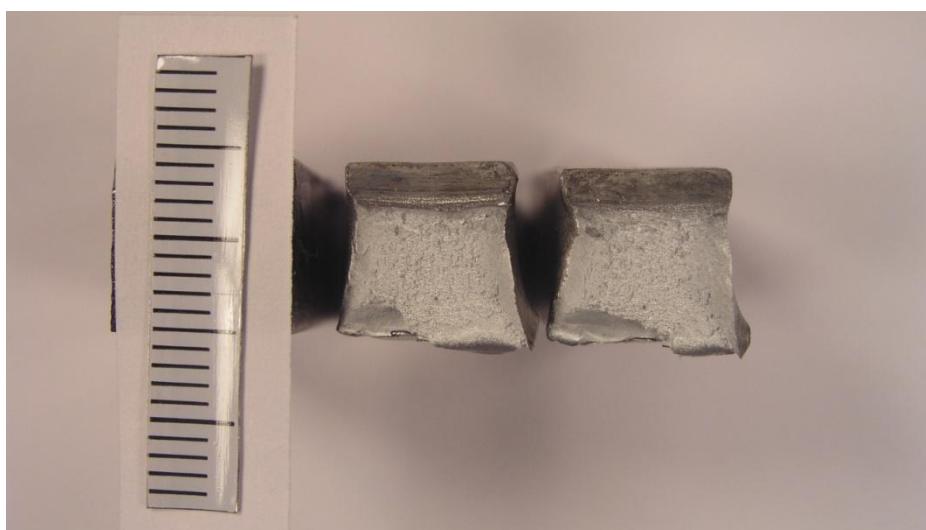
Tablica 10. Postotni udio duktilnog loma za dimenzije u milimetrima

B mm	A mm																		
	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0	5,5	6,0	6,5	7,0	7,5	8,0	8,5	9,0	9,5	10
1,0	99	98	98	97	96	96	95	94	94	93	92	92	91	91	90	89	89	88	88
1,5	98	97	96	95	94	93	92	92	91	90	89	88	87	86	85	84	83	82	81
2,0	98	96	95	94	92	91	90	89	88	86	85	84	82	81	80	79	77	76	75
2,5	97	95	94	92	91	89	88	86	84	83	81	80	78	77	75	73	72	70	69
3,0	96	94	92	91	89	87	85	83	81	79	77	76	74	72	70	68	66	64	62
3,5	96	93	91	89	87	85	82	80	78	76	74	72	69	67	65	63	61	58	56
4,0	95	92	90	88	85	82	80	77	75	72	70	67	65	62	60	57	55	52	50
4,5	94	92	89	86	83	80	77	75	72	69	66	63	61	58	55	52	49	46	44
5,0	94	91	88	85	81	78	75	72	69	66	62	59	56	53	50	47	44	41	37
5,5	93	90	86	83	79	76	72	69	66	62	59	55	52	48	45	42	38	35	31
6,0	92	89	85	81	77	74	70	66	62	59	55	51	47	44	40	36	33	29	25
6,5	92	88	84	80	76	72	67	63	59	55	51	47	43	39	35	31	27	23	19
7,0	91	87	82	78	74	69	65	61	56	52	47	43	39	34	30	26	21	17	12
7,5	91	86	81	77	72	67	62	58	53	48	44	39	34	30	25	20	16	11	6
8,0	90	85	80	75	70	65	60	55	50	45	40	35	30	25	20	15	10	5	0

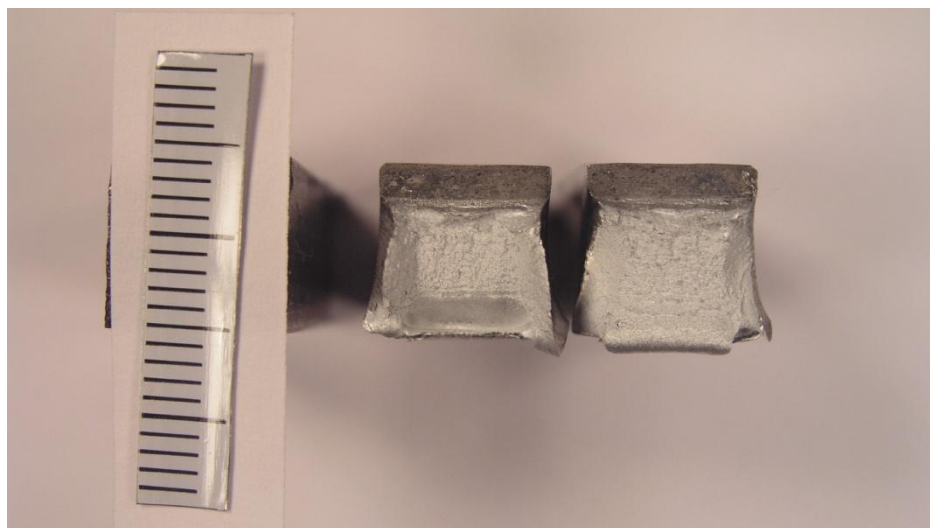
Prijelomne površine epruveta nakon ispitivanja udarnog rada loma prikazane su slikama 78 do 88.



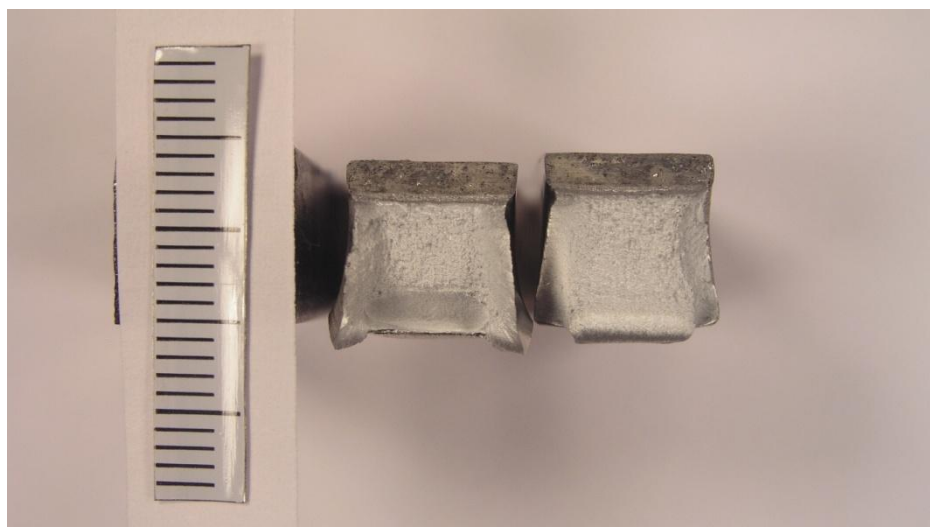
Slika 78. Prijelomna površina epruvete 30 / rastvorno žareno i gašeno u vodi



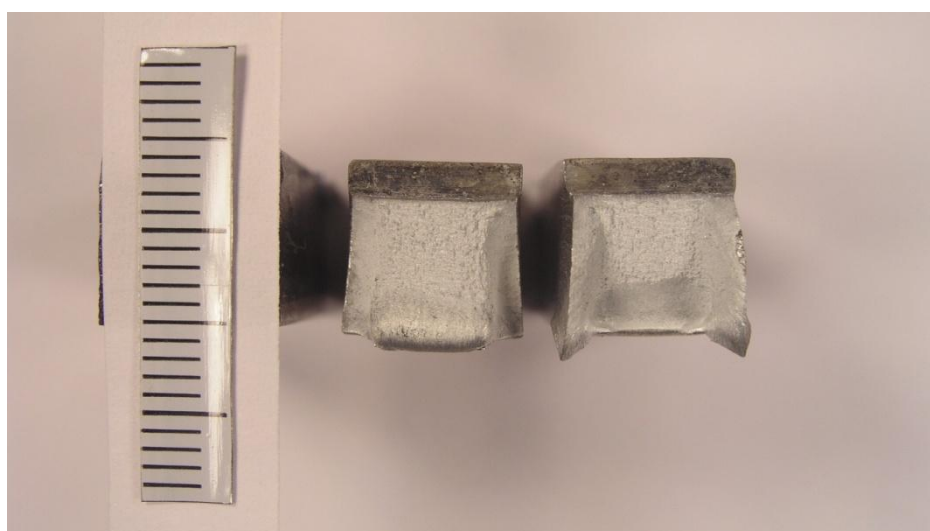
Slika 79. Prijelomna površina epruvete 33 / rastvorno žareno i hlađeno na zraku



Slika 80. Prijelomna površina epruvete 1 / dozrijevano 1 h pri 130 °C

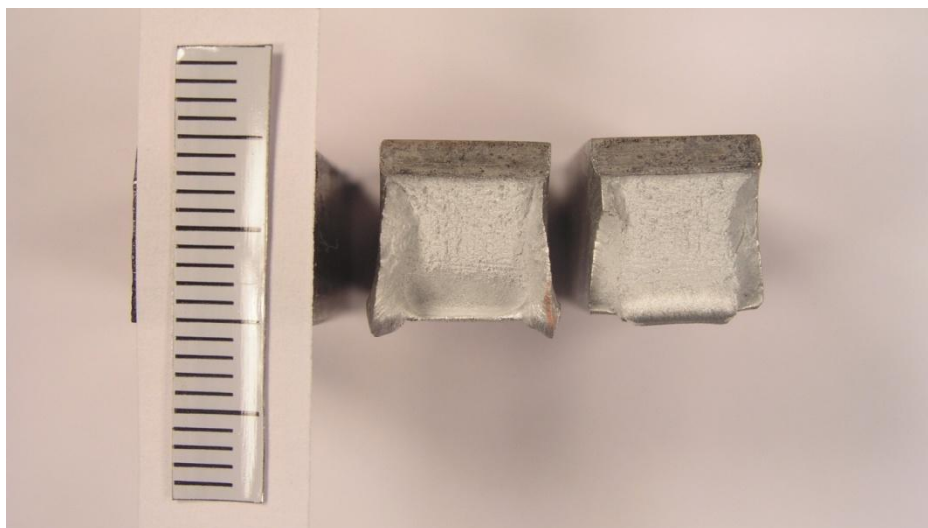


Slika 81. Prijelomna površina epruvete 4 / dozrijevano 4 h pri 130 °C



Slika 82. Prijelomna površina epruvete 7 / dozrijevano 10 h pri 130 °C

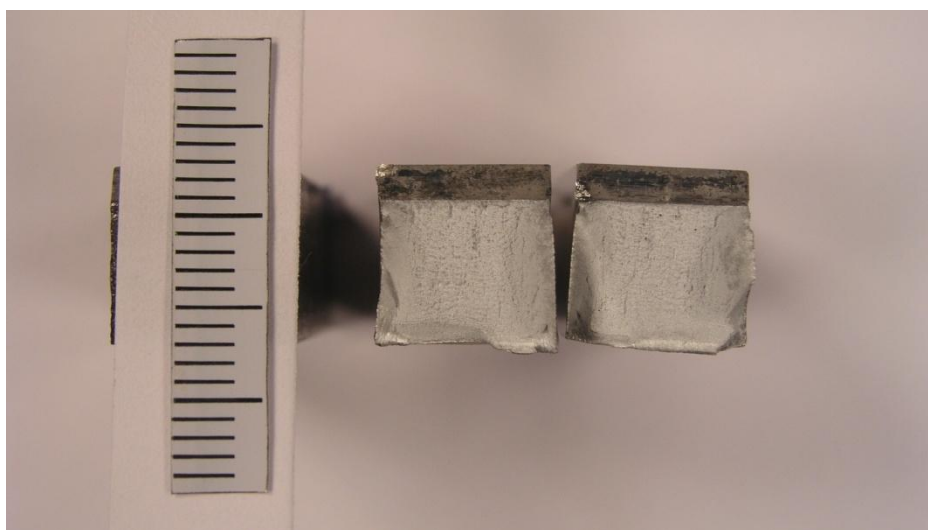




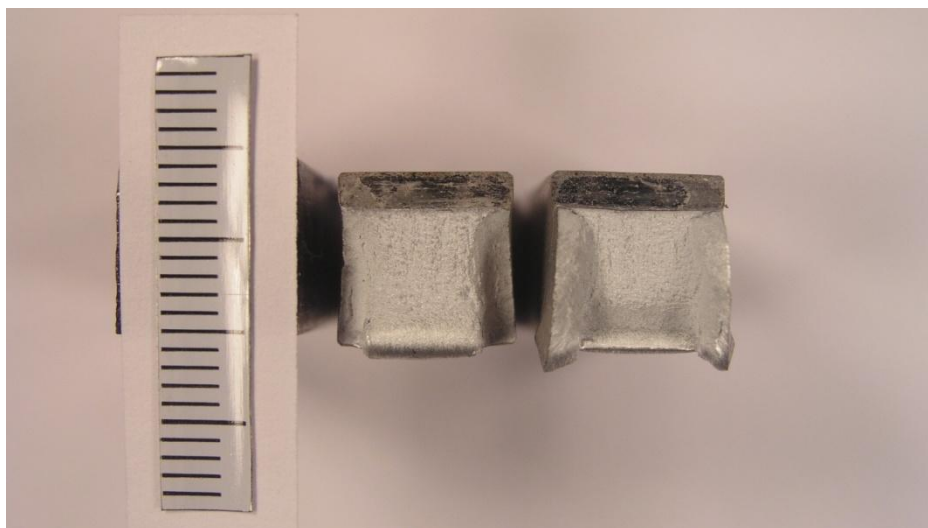
Slika 83. Prijelomna površina epruvete 10 / dozrijevano 1 h pri 160 °C



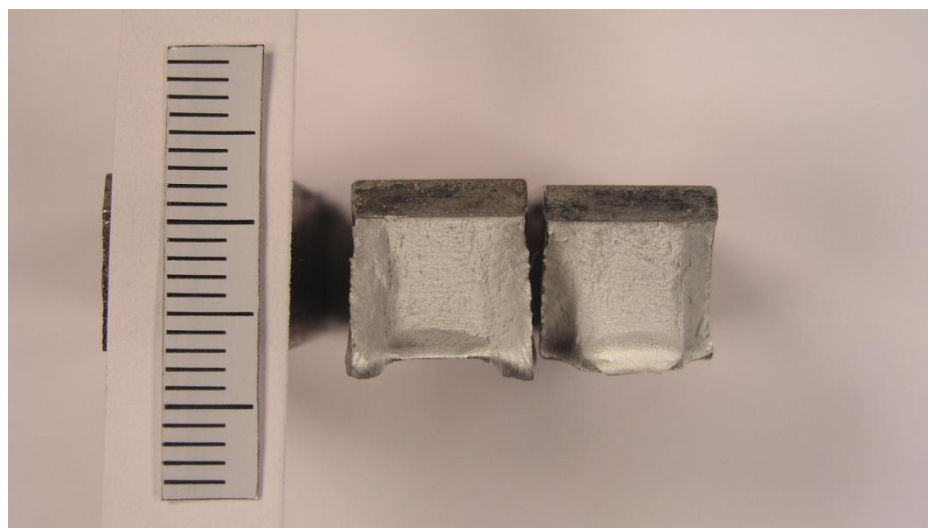
Slika 84. Prijelomna površina epruvete 13 / dozrijevano 4 h pri 160 °C



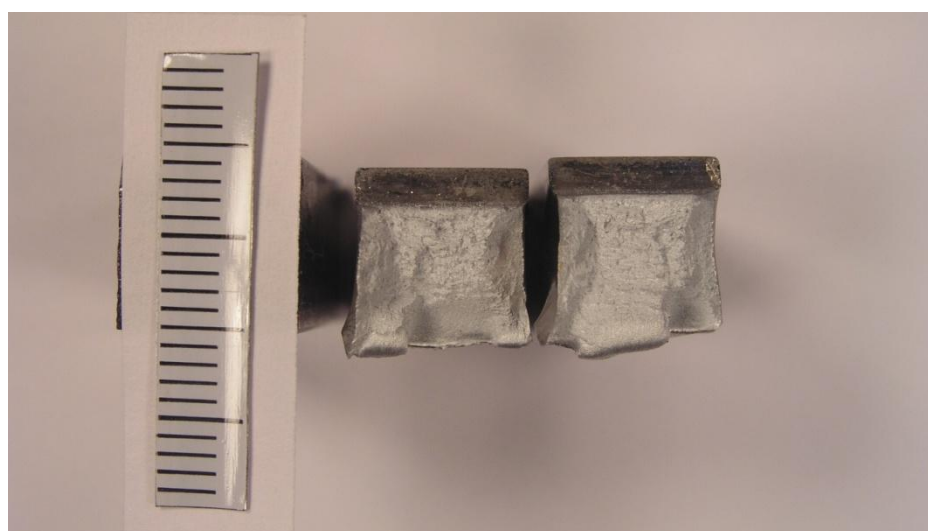
Slika 85. Prijelomna površina epruvete 16 / dozrijevano 10 h pri 160 °C



Slika 86. Prijelomna površina epruvete 19 / dozrijevano 1 h pri 190 °C

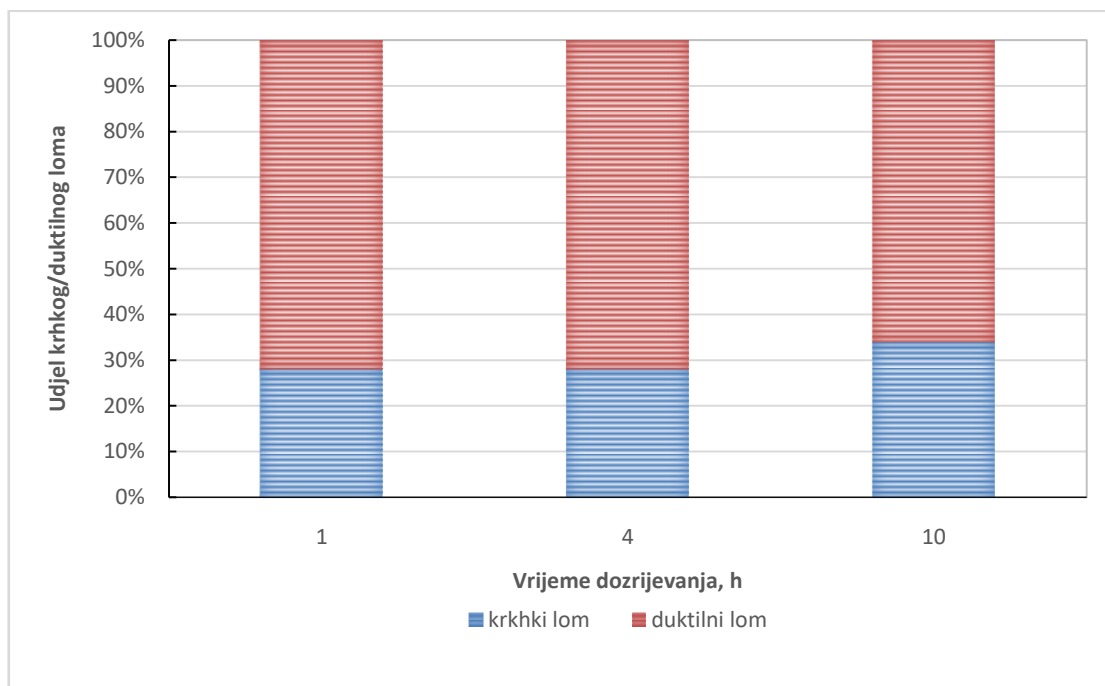


Slika 87. Prijelomna površina epruvete 22 / dozrijevano 4 h pri 190 °C

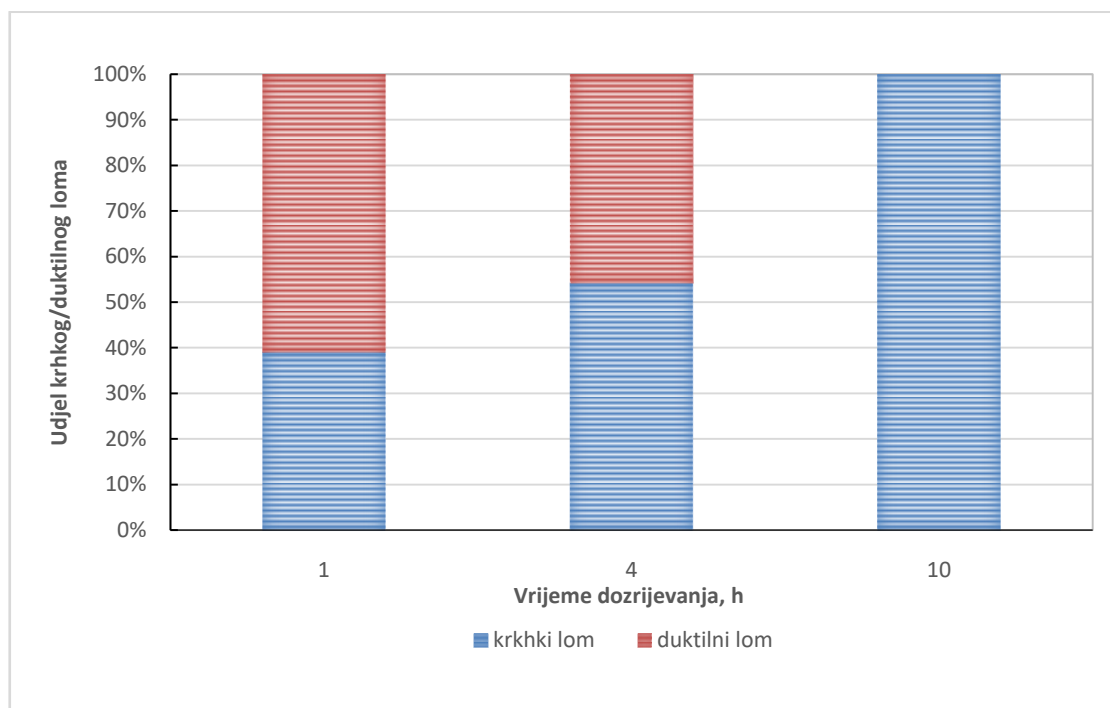


Slika 88. Prijelomna površina epruvete 25 / dozrijevano 10 h pri 190 °C

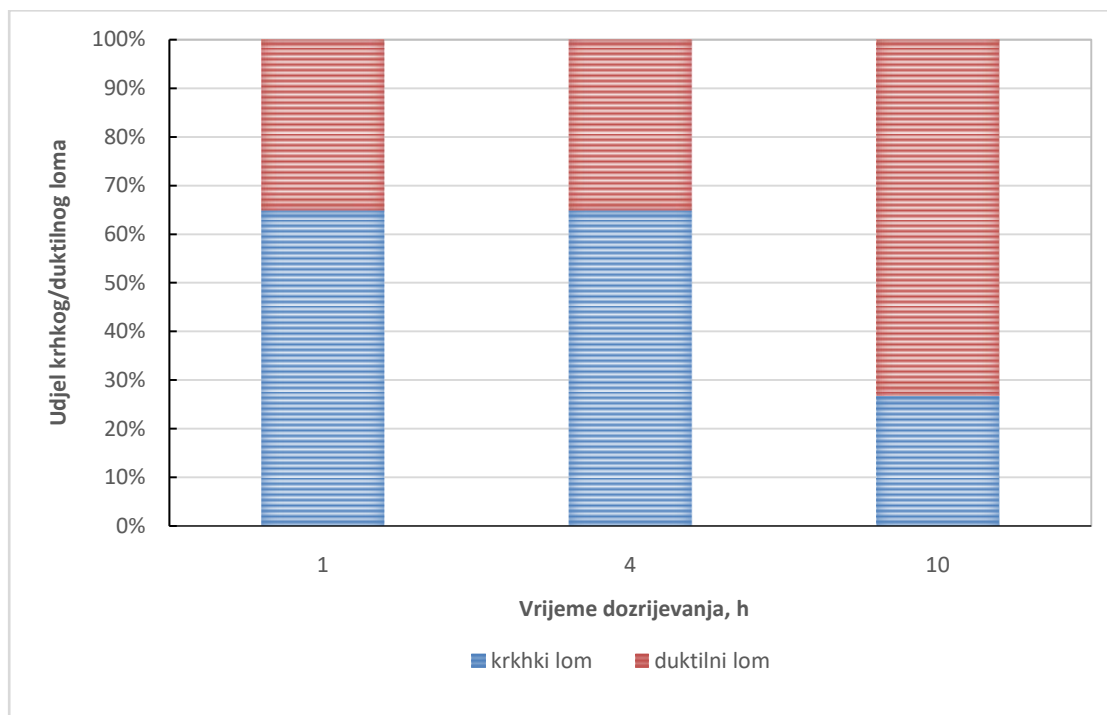
Na slikama 89 do 91 grafički su prikazani udjeli krhkog i duktilnog loma za svaku temperaturu dozrijevanja u vremenu od 1, 4 i 10 h.



Slika 89. Udjeli krhkog i duktilnog loma / dozrijevano pri 130 °C



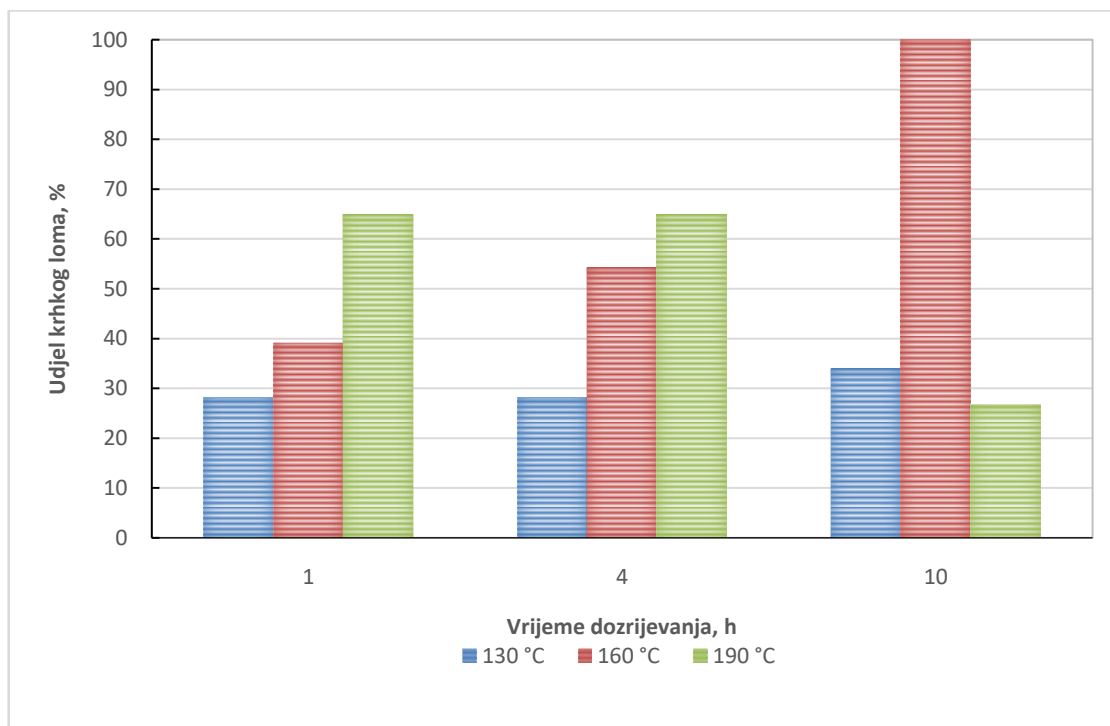
Slika 90. Udjeli krhkog i duktilnog loma / dozrijevano pri 160 °C



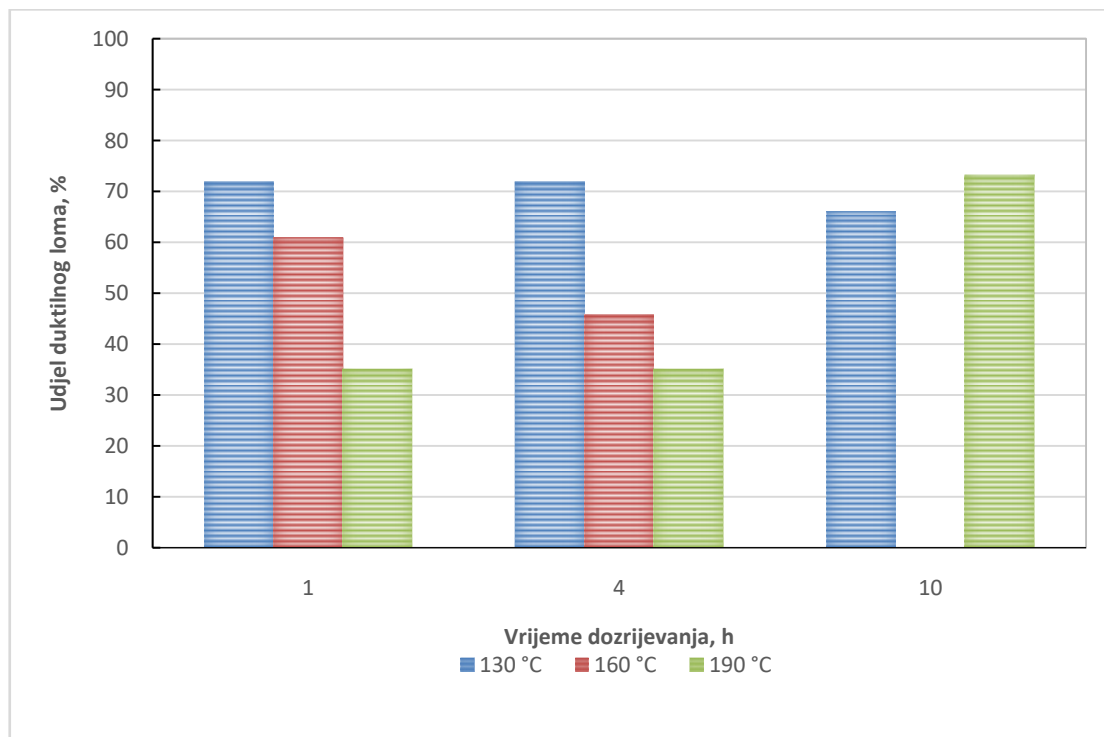
Slika 91. Udjeli krhkog i duktilnog loma / dozrijevano pri 190 °C

Kako se može vidjeti na slikama 89 i 90 s porastom vremena dozrijevanja raste udio krhkog loma budući da dolazi do precipitacijskog očvrnuća čime se povećava tvrdoća i snižava žilavosti a time i udio duktilnog loma. Pri temperaturi 190 °C i trajanju dozrijevanja 4 sata dolazi do prekretnice kada zbog predozrijevanja pada udio krhkog loma i raste žilavost legure što se očituje većom površinom duktilnog loma.

Zbirni prikaz udjela krhkog i žilavog loma za sve tri temperature dozrijevanja 130, 160 i 190 °C dan je na slikama 92 odnosno 93.



Slika 92. Ovisnost postotnog udjela krhkog loma o temperaturi i vremenu dozrijevanja



Slika 93. Ovisnost postotnog udjela duktilnog loma o temperaturi i vremenu dozrijevanja

## 7. ZAKLJUČAK

Na temelju provedenih ispitivanja moguće je zaključiti sljedeće:

Ispitivana legura AlMg1Si sklona je precipitacijskom očvrnuću postupkom rastopnog žarenja i dozrijevanja. U odnosu na rastopno žareno i gašeno stanje, svi postupci dozrijevanja, izuzev onog na temperaturi 130 °C u trajanju 1 h, rezultiraju porastom tvrdoće ali i padom žilavosti. Umjetnim dozrijevanjem pri 130 °C u trajanju od nekoliko sati dolazi do blagog porasta tvrdoće. Optimalno je leguru obrađivati pri 160 °C kada nastupa zamjetno povećanje tvrdoće tako da se u vremenu od 10 sati postiže maksimalna tvrdoća od 121 HV. Porast tvrdoće povezan je s izlučivanjem sitnih jednoliko raspšenih precipitata interemetalne faze, najvjerojatnije Mg<sub>2</sub>Si, unutar  $\alpha$  kristala mješanca aluminija. Obrada pri 190 °C daje lošije rezultate jer zbog visoke temperature i velike brzine difuzijskih procesa stvaranje nekoherentnih precipitata, izdvojenih od matrice, vrlo je brzo, nakon samo nekoliko sati dozrijevanja (cca 4 h), čime nestaje izvitoperenje kristalne rešetke i smanjuju se unutarnja naprezanja koja koče gibanje dislokacija pa ako se vrijeme produži brza precipitacija ovih nekoherentnih čestica dovodi do smanjenja tvrdoće i povećanja žilavosti. Legura je u tom stanju predozrijevana što vodi pogoršanje mikrostrukture i svojstava. Iz svega navedenog proizlazi da je potrebno pažljivo kontrolirati proces dozrijevanja žele li se postići optimalne vrijednosti mehaničkih svojstava u pogledu tvrdoće, čvrstoće i žilavosti. Odabirom pravilnih parametara dozrijevanja može se balansirati odnos između tvrdoće i žilavosti, ovisno o tome koje je svojstvo primarno za određenu primjenu.

## LITERATURA

- [1]. T. Filetin, F. Kovačiček, J. Indof: *Svojstva i primjena materijala*, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Ivana Lučića 5, Zagreb, 2009.
- [2]. D. Ćorić, T. Filetin: *Materijali u zrakoplovstvu*, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Ivana Lučića 5, Zagreb, 2012.
- [3]. M. Franz: *Mehanička svojstva materijala*, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Ivana Lučića 5, Zagreb, 1998.
- [4]. HRVATSKA NORMA HRN EN ISO 148-1, Metalni materijali- Ispitivanje udarnog rada loma Charpyjevim batom
- [5]. <http://www.newslavich.com/content/use-high-pure-aluminum.html> (preuzeto 24.5.2017.)
- [6]. <http://miroslavjakovljevic.iz.hr/o-aluminiju/> (preuzeto 10.6.2017.)
- [7]. <https://doi.org/10.14256/JCE.1395.2015> (preuzeto 13.6.2017.)
- [8]. <http://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=2863> (preuzeto 13.6.2017.)
- [9]. <http://www.hydro.com/en/about-aluminium/how-its-made/> (preuzeto 22.6.2017.)
- [10]. <http://sam.davyson.com/as/physics/aluminium/site/properties.html> (preuzeto 22.6.2017.)
- [11]. <https://en.wikipedia.org/wiki/Bauxite> (preuzeto 22.6.2017.)
- [12]. <http://www.aluminum.org/product-markets/automotive> (preuzeto 28.6.2017.)

## PRILOG

**Tablica T1:** Rezultati ispitivanja udarnog rada loma

Uzorak	Temperatura dozrijevanja, °C	Vrijeme držanja, h	KV, J
1	130	1	57,0
2			58,5
3			57,5
4	130	4	49,5
5			48,0
6			50,5
7	130	10	39,0
8			42,5
9			38,0
10	160	1	42,0
11			37,0
12			39,0
13	160	4	23,0
14			20,0
15			20,0
16	160	10	18,0
17			18,5
18			21,0
19	190	1	35,0
20			37,0
21			36,0
22	190	4	25,0
23			27,5
24			38,0 (28,0)
25	190	10	41,0
26			45,5
27			47,0
28	-	-	52,0
29			54,0
30			53,0
31	-	-	54,0
32			51,0
33			50,0



**Tablica T2:** Rezultati ispitivanja tvrdoće nedozrijevanih uzoraka

Uzorak	Toplinska obrada	Redni broj mjerjenja	d <sub>1</sub> , mm	d <sub>2</sub> , mm	HV1
0	Polazno stanje	1	0,1480	0,1459	85,8
		2	0,1453	0,1435	88,9
		3	0,1480	0,1479	84,6
		4	0,1497	0,1411	87,7
		5	0,1448	0,1426	89,8
		$\bar{x}$	-	-	<b>87,4</b>
33	Rastvorno žarenje i hlađenje na zraku	1	0,1877	0,1862	53,1
		2	0,1917	0,1890	51,1
		3	0,1911	0,1864	52,0
		4	0,1875	0,1878	52,6
		5	0,1877	0,1862	53,1
		$\bar{x}$	-	-	<b>52,4</b>
30	Rastvorno žarenje i gašenje u vodi	1	0,1722	0,1741	61,8
		2	0,1751	0,1745	60,6
		3	0,1708	0,1740	62,3
		4	0,1702	0,1735	62,7
		5	0,1719	0,1716	62,8
		$\bar{x}$	-	-	<b>62,0</b>

**Tablica T3:** Rezultati ispitivanja tvrdoće uzoraka dozrijevanih na 130 °C

Uzorak	Toplinska obrada	Redni broj mjerjenja	d <sub>1</sub> , mm	d <sub>2</sub> , mm	HV1
1	Rastvorno žarenje i gašenje u vodi  Dozrijevanje 130 °C / 1 h	1	0,1729	0,1720	62,3
		2	0,1726	0,1712	62,7
		3	0,1727	0,1715	62,6
		4	0,1715	0,1709	63,2
		5	0,1695	0,1706	64,0
		$\bar{x}$	-	-	<b>63,0</b>
4	Rastvorno žarenje i gašenje u vodi  Dozrijevanje 130 °C / 4 h	1	0,1596	0,1583	73,3
		2	0,1629	0,1596	71,2
		3	0,1622	0,1571	72,7
		4	0,1593	0,1580	73,6
		5	0,1591	0,1580	73,7
		$\bar{x}$	-	-	<b>72,9</b>
7	Rastvorno žarenje i gašenje u vodi  Dozrijevanje 130 °C / 10 h	1	0,1561	0,1494	79,4
		2	0,1525	0,1493	81,4
		3	0,1538	0,1531	78,7
		4	0,1531	0,1519	79,7
		5	0,1522	0,1512	80,5
		$\bar{x}$	-	-	<b>79,9</b>

**Tablica T4:** Rezultati ispitivanja tvrdoće uzoraka dozrijevanih na 160 °C

Uzorak	Toplinska obrada	Redni broj mjerjenja	d <sub>1</sub> , mm	d <sub>2</sub> , mm	HV1
10	Rastvorno žarenje i gašenje u vodi  Dozrijevanje 160 °C / 1 h	1	0,1451	0,1435	89,0
		2	0,1451	0,1415	90,3
		3	0,1418	0,1428	91,5
		4	0,1427	0,1437	90,4
		5	0,1448	0,1434	89,3
		$\bar{x}$	-	-	<b>90,1</b>
13	Rastvorno žarenje i gašenje u vodi  Dozrijevanje 160 °C / 4 h	1	0,1281	0,1266	114,2
		2	0,1240	0,1265	118,1
		3	0,1271	0,1278	114,0
		4	0,1254	0,1293	114,2
		5	0,1269	0,1281	114,0
		$\bar{x}$	-	-	<b>114,9</b>
16	Rastvorno žarenje i gašenje u vodi  Dozrijevanje 160 °C / 10 h	1	0,1247	0,1230	120,7
		2	0,1222	0,1239	122,3
		3	0,1222	0,1212	125,2
		4	0,1257	0,1265	116,6
		5	0,1252	0,1228	120,6
		$\bar{x}$	-	-	<b>121,1</b>

**Tablica T5:** Rezultati ispitivanja tvrdoće uzoraka dozrijevanih na 190 °C

Uzorak	Toplinska obrada	Redni broj mjerjenja	d <sub>1</sub> , mm	d <sub>2</sub> , mm	HV1
19	Rastvorno žarenje i gašenje u vodi  Dozrijevanje 190 °C / 1 h	1	0,1348	0,1347	102,0
		2	0,1343	0,1337	103,2
		3	0,1340	0,1337	103,4
		4	0,1345	0,1352	101,8
		5	0,1362	0,1364	99,8
		$\bar{x}$	-	-	<b>102,0</b>
22	Rastvorno žarenje i gašenje u vodi  Dozrijevanje 190 °C / 4 h	1	0,1301	0,1255	113,5
		2	0,1299	0,1284	111,0
		3	0,1274	0,1267	114,7
		4	0,1256	0,1289	114,4
		5	0,1301	0,1278	111,4
		$\bar{x}$	-	-	<b>113,0</b>
25	Rastvorno žarenje i gašenje u vodi  Dozrijevanje 190 °C / 10 h	1	0,1496	0,1469	84,3
		2	0,1456	0,1441	88,3
		3	0,1464	0,1475	85,8
		4	0,1479	0,1469	85,3
		5	0,1481	0,1471	85,1
		$\bar{x}$	-	-	<b>85,8</b>